

SÉRIE A, n° 1469

N° D'ORDRE : 2335

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Virgil N. GHITESCU

Licencié ès Sciences

1^{re} THÈSE. — Recherches sur l'évolution de la composition chimique élémentaire des végétaux au cours de leur développement.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 9 AVRIL 1934 1934, devant la Commission d'examen

Président : M. GABRIEL BERTRAND.

Examineurs : { M. JEAN PERRIN.
M. RAOUL COMBES.

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1934

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Virgil N. GHITESCU

Licencié ès Sciences

1^{re} THÈSE. — Recherches sur l'évolution de la composition chimique élémentaire des végétaux au cours de leur développement.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le

1934, devant la Commission d'examen

Président : M. GABRIEL BERTRAND.

Examineurs : { M. JEAN PERRIN.
 { M. RAOUL COMBES.

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1934

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.

<i>Professeurs honoraires</i>	H. LE CHATELIER.	LÉON BRILLOUIN.
	H. LEBESGUE.	E. GOURSAT.
	A. FERNBACH.	WALLERANT.
	A. LEDUC.	GUILLET.
	EMILE PICARD.	PÉCHARD.
	Rémy FERRIER.	FREUNDLER.

PROFESSEURS

P. JANET.	T	Electrotechnique générale.	G. BRUHAT.	Physique.
G. BERTRAND. . .	T	Chimie biologique.	E. DARMOIS. . . .	Physique.
M ^{me} P. CURIE. . .	T	Physique générale.	A. DEBIERNE. . . .	Radioactivité.
M. CAULLERY. . .	T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	A. DUFOUR.	T Physique (P. C. N.).
G. URBAIN.	T	Chimie générale.	L. DUNOYER.	Optique appliquée.
Emile BOREL. . . .	T	Calcul des probabilités et Physique mathém.	A. GUILLIERMOND. T	Botanique (P. C. N.)
L. MARCHIS. . . .	T	Aviation.	M. JAVILLIER. . . .	Chimie biologique.
Jean PERRIN. . . .	T	Chimie physique.	L. JOLEAUD.	Paléontologie.
H. ABRAHAM. . . .	T	Physique.	ROBERT-LÉVY. . . .	Zoologie.
E. CARTAN.	T	Géométrie supérieure.	H. MOUTON.	Chimie physique.
M. MOLLIARD. . . .	T	Physiologie végétale.	E. PICARD.	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
L. LAPICQUE. . . .	T	Physiologie générale.	Henri VILLAT. . . .	T Mécanique des fluides et applications.
E. VESSIOT.	T	Théorie des fonctions et théorie des transformations.	Ch. JACOB.	T Géologie.
A. COTTON.	T	Physique.	P. PASCAL.	T Chimie minérale.
J. DRACH.	T	Analyse supérieure.	M. FRÉCHET.	T Calcul des Probabilités et Physique mathématique.
Charles FABRY. . .	T	Physique.	E. ESCLANGON. . . .	T Astronomie.
Charles PÉREZ. . .	T	Zoologie.	M ^{me} RAMART-LUCAS.	Chimie organique.
Léon BERTRAND. .	T	Géologie structurale et géologie appliquée.	H. BÉGHIN.	T Mécanique physique et expérimentale.
E. BLAISE.	T	Chimie organique.	FOCH.	Mécanique expérimentale des fluides
R. LESPIEAU. . . .	T	Théories chimiques.	PAUTHENIER.	Physique (P. C. N.).
P. PORTIER.	T	Physiologie comparée.	De BROGLIE.	T Théories physiques.
E. RABAUD.	T	Biologie expérimentale.	CHRÉTIEN.	Optique appliquée.
P.-A. DANGEARD. .	T	Botanique.	P. JOB.	Chimie générale.
V. AUGER.	T	Chimie appliquée.	LABROUSTE.	Physique du Globe.
M. GUICHARD. . . .	T	Chimie minérale.	PRENANT.	Zoologie.
Paul MONTEL. . . .	T	Mécanique rationnelle.	VILLEY.	Mécanique physique et expérimentale.
P. WINTREBERT. .	T	Anatomie et histologie comparées.	BOHN.	Zoologie (P. C. N.).
L. BLARINGHEM. .	T	Botanique.	COMBES.	Sciences naturelles (P.C.N.)
O. DUBOSCQ. . . .	T	Biologie maritime.	GARNIER.	Mécanique rationnelle.
G. JULIA.	T	Mécanique analytique.	PÈRES.	Mécanique des fluides.
C. MAUGUIN. . . .	T	Minéralogie.	HACKSPILL.	Chimie (P. C. N.).
A. MICHEL-LÉVY. .	T	Pétrographie.	LAUGIER.	Physiologie générale.
H. BÉNARD.	T	Mécanique expérimentale des fluides.	TOUSSAINT.	Technique Aéronautique.
A. DENJOY.	T	Calcul différentiel et calcul intégral.	M. CURIE.	Physique (P. C. N.).
L. LUTAUD.	T	Géographie physique et géologie dynamique.	G. RIBAUD.	T Hautes températures.
Eugène BLOCH. . .	T	Physique théorique et physique céleste.	CHAZY.	Mathématiques.
			GAULT.	Chimie (P. C. N.).
			CROZE.	Physique.
			DUPONT.	Chimie (P. C. N.).
			LANQUINE.	Géologie.

Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



A MONSIEUR LE PROFESSEUR GABRIEL BERTRAND

Membre de l'Institut

Membre de l'Académie de Médecine

Vice-Président de l'Académie d'Agriculture

Professeur à la Faculté des Sciences

Chef de Service à l'Institut Pasteur

Hommage de reconnaissance.

A MA FEMME

A MES PARENTS

Recherches sur l'évolution
de la
composition chimique élémentaire des végétaux
au cours de leur développement

Introduction.

I. — Les méthodes de la biochimie.

MÉTHODE ANALYTIQUE ET MÉTHODE SYNTHÉTIQUE.

La chimie biologique étudie, comme son nom l'indique, la chimie des êtres vivants.

Perfectionnant et adaptant aux recherches biochimiques les deux méthodes fondamentales de la chimie, la méthode analytique et la méthode synthétique, la chimie biologique s'est trouvée en mesure d'aborder et d'élucider quelques-uns des problèmes relatifs à la présence chez les êtres vivants d'une assez nombreuse série de corps simples, métalloïdes et métaux.

Les premières recherches en ce sens se situent au commencement du XIX^e siècle ; elles prennent plus de forme et un peu plus de précision seulement dans la deuxième moitié du siècle dernier.

Il y a à peine quarante ans, BUNGE considérait que seulement treize éléments entraient dans la composition de la matière vivante.

Dans ces dernières années, le perfectionnement apporté aux méthodes analytiques surtout par Gab. BERTRAND et les travaux effectués sous sa direction par JAVILLIER,

AGULHON, VLADESCU, PERIETEANU, etc.. ont amené la découverte de toute une série d'autres corps simples, de telle sorte qu'aujourd'hui on admet l'existence de trente éléments environ dans la matière vivante, soit le tiers des éléments connus.

La plupart des techniques adoptées par les biochimistes dans ces recherches, peuvent se rattacher à deux méthodes principales.

L'une consiste à étudier la matière vivante en caractérisant les substances chimiques qui entrent dans sa composition ; c'est la méthode analytique.

Les indications données par ce procédé sont des plus intéressantes, mais elles ne suffisent pas.

On sait, par exemple, que les plantes possèdent la faculté de fixer non seulement les éléments qui leur sont nécessaires, mais encore dans une certaine mesure ceux qui leur sont indifférents, voire même nuisibles. On peut donc s'attendre à trouver dans les végétaux, en proportions plus ou moins importantes, la plupart des métalloïdes et des métaux existant dans le milieu où ils se développent.

Lorsque par les méthodes d'analyse on est arrivé à déterminer tous les éléments présents dans un être vivant, on n'est pas en droit de conclure que chacun de ces éléments a un rôle dans la vie de cet individu.

Il reste à savoir quels sont, parmi tous ces corps, ceux qui jouent réellement un rôle dans la vie de la plante et ceux qui s'y rencontrent tout simplement parce que présents dans le substratum.

La méthode analytique se complète ici par la méthode synthétique et c'est seulement de l'ensemble des résultats acquis par l'application des deux méthodes qu'on peut tirer la démonstration de l'utilité ou de l'inutilité d'un élément.

Les renseignements fournis par la première méthode nous permettent de constituer un milieu artificiel, formé de composés chimiques définis et appropriés aux besoins du végétal en étude, qui remplacera le milieu naturel.

Chaque corps devra être pris à part, supprimé ou ajouté

aux milieux synthétiques dans lesquels on cultivera l'être vivant.

La méthode analytique qui a servi de point de départ à la méthode synthétique doit aussi lui venir en aide en tant que moyen de vérification.

Lorsque chaque élément trouvé aura été ainsi étudié en détail et pour le plus grand nombre d'individus possible, on pourra savoir alors s'il existe une unité de composition chimique des divers êtres vivants.

II. — Composition élémentaire des êtres vivants.

CLASSIFICATION : ÉLÉMENTS PLASTIQUES ET ÉLÉMENTS CATALYTIQUES.

Ainsi qu'il a été dit plus haut les biochimistes ont pu déceler dans la matière de tous les êtres vivants, la présence constante d'environ une trentaine de corps simples : les uns en quantité notable, les autres à l'état de traces.

On peut se demander si nous sommes aujourd'hui en état de procéder à la classification de ces éléments constituants de la matière vivante.

Ce n'est pas chose facile. La classification la plus logique est celle qui a en vue le rôle physiologique que l'élément considéré joue dans l'économie de l'être organisé. Elle est la plus satisfaisante, mais elle n'est pas rigoureusement absolue, certains éléments pouvant être à la fois plastiques et catalytiques.

En considérant leur rôle physiologique, Gab. BERTRAND a proposé de classer les éléments en deux grandes catégories.

a) LES ÉLÉMENTS PLASTIQUES, qui se trouvent en général en assez fortes proportions, formant de leurs multiples combinaisons la masse des principes immédiats et la base minérale des êtres vivants.

Cette catégorie comprend onze éléments parmi lesquels on trouve sept métalloïdes et quatre métaux à savoir ; d'une

part le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le chlore, le soufre et le phosphore, d'autre part le calcium, le magnésium le potassium et le sodium. Quand on fait le total des divers pourcentages de ces éléments on n'est pas bien loin de cent ; on obtient environ 99,9 %.

b) LES ÉLÉMENTS CATALYTIQUES. Sous cette expression il faut comprendre la totalité des éléments qui se trouvent dans la matière vivante en proportions extrêmement faibles et qui agissent dans les phénomènes biologiques à la façon des catalyseurs chimiques. Leur rôle est d'ordre dynamique.

Dans cette deuxième catégorie se rangent ; le manganèse, le fer, le zinc, le nickel, le cobalt, le cuivre, l'arsenic, le bore, le fluor, le brome, l'iode, etc...

Quant à leur proportion, ils représentent dans l'ensemble environ 0,1 % de la matière sèche ; si on les ajoute au 99,9 % d'éléments déjà considérés, ils nous permettraient d'atteindre le total de 100 % d'une analyse parfaite.

Ce sont donc de véritables « infiniment petits chimiques » suivant la définition de Gab. BERTRAND.

III. — Applications pratiques : Les engrais chimiques

La connaissance exacte des éléments chimiques qui entrent dans l'édification des êtres vivants présente non seulement un intérêt théorique mais encore un intérêt d'ordre pratique. En effet, l'agriculture, la médecine, l'hygiène, et la toxicologie en tirent d'énormes avantages. Je résumerai brièvement les applications à l'agriculture et plus spécialement aux engrais chimiques.

L'analyse des plantes montre la présence constante d'une partie fixe, incombustible, appelée cendre. En étudiant cette partie fixe, on voit qu'elle est formée de toute une série de corps simples, dont l'origine est évidente. Ces éléments sont enlevés au sol qui, à la suite de plusieurs cultures, arrive rela-

tivement vite à épuiser ses réserves et ne suffit plus aux besoins des cultures ultérieures.

La chimie biologique a rendu un grand service à l'agriculture, en précisant la nature des éléments que les plantes assimilent normalement en épuisant le sol.

C'est ainsi qu'a pris naissance l'idée de l'emploi des engrais chimiques, destinés à combler les pertes que la terre subit après chaque récolte, et que s'est précisée la formule de leur composition.

Mais l'agriculture n'a pas exploité encore toutes les connaissances que la biologie lui a fournies.

En effet, la formule de l'engrais chimique, dit complet, comprend des sels ammoniacaux ou des nitrates, une substance apportant du phosphore (phosphates), et des sels de potassium, c'est-à-dire seulement trois éléments : azote, phosphore et potassium. Or, l'analyse montre que le nombre des corps simples extraits de la terre par les végétaux est bien plus considérable. Le sol s'épuise donc en ces éléments d'une manière appréciable, surtout en ce qui concerne les éléments qui ordinairement ne se trouvent pas abondamment répandus ; il paraît donc nécessaire de les lui rendre de temps en temps.

Si l'engrais chimique d'aujourd'hui, désigné encore sous le nom « d'engrais complet » auquel il faut sûrement ajouter le soufre, le calcium, et le magnésium, arrive à combler les pertes subies par le sol quant aux éléments plastiques rappelés plus haut, il n'apporte rien en ce qui concerne les éléments catalytiques.

A ce sujet il faut rappeler l'intervention que Gabriel BERTRAND a faite dans ce sens, dès 1903, à l'occasion du congrès de chimie appliquée tenu à Berlin (13).

Depuis cette époque de nombreuses expériences ont été réalisées concernant l'emploi préconisé par ce savant, de l'élément manganèse comme agent fertilisateur du sol.

Pour donner une idée de l'importance que présente pour l'agriculture l'emploi d'un engrais complémentaire, il est intéressant de citer que LOEW et ASO (1905) ont obtenu avec

le riz une augmentation de récolte de 42 % sous l'influence de quelques millièmes de manganèse. De même Gab. BERTRAND, en collaboration avec THOMASSIN (23) a obtenu pour l'avoine dans les conditions de la grande culture, une augmentation de récolte de 22,5 %, en employant comme engrais complémentaire du sulfate de manganèse à raison d'environ 15 kgr. de métal par hectare.

Les mêmes constatations sont à faire à propos du bore employé comme engrais catalytique, ainsi que l'a très bien montré AGULHON (2), avec 5 à 10 kgr. de bore (à l'état d'acide borique) par hectare on obtient pour le maïs fourrager, des augmentations de récolte allant de 39 à 50 %.

Le zinc présente tout autant d'importance comme engrais catalytique ainsi que l'ont montré JAVILLIER (49, 50) dans ses expériences sur le maïs en pleine terre, et plus tard MAZÉ (64, 65) sur le maïs cultivé dans une solution nutritive, à l'abri des microbes.

Les résultats sont encore aussi probants pour bien d'autres éléments, tant par leur action sur le développement des végétaux que par leur action sur les microbes du sol.

Ces quelques exemples démontrent nettement l'importance considérable que présente pour la science et pour l'agriculture, l'étude de la composition chimique des êtres vivants. Les travaux antérieurs qui ont été poursuivis dans ce sens s'intéressent le plus souvent à la présence d'un seul élément dans la matière vivante, rarement de deux ou de trois, plus rarement encore d'un plus grand nombre d'éléments. D'autre part, très peu d'auteurs se sont préoccupés d'étudier une même plante aux diverses époques de sa vie afin de suivre la variation avec l'âge de l'absorption des substances nutritives.

Ce problème est cependant d'une importance évidente parce qu'il facilite la compréhension du phénomène de nutrition durant la vie des végétaux ; il permet de voir dans quelle mesure les éléments nutritifs sont absorbés par les plantes aux différents stades de leur évolution, et de saisir les rapports réciproques qui existent alors entre ces divers éléments.

A côté de l'intérêt scientifique qu'elle présente, l'étude de

ce problème est de la plus grande importance au point de vue pratique.

Il serait en effet intéressant de savoir, pour une époque déterminée, quelles sont les exigences d'une plante en éléments nutritifs ; on pourrait alors faire en sorte que la plante arrivée à un certain stade de développement, trouve dans le sol tous les éléments dont elle a besoin, ces éléments étant fournis sous forme d'engrais de composition convenablement choisies. L'idéal serait même que ces engrais puissent lui apporter sous une forme assimilable, les éléments nécessaires dans les proportions même où on les trouve à ce même moment dans la plante.

Les quelques résultats qui ont été publiés précédemment reposent parfois sur des méthodes d'analyse insuffisamment précises, ils n'inspirent pas toujours assez de confiance.

D'autre part, à côté de ces imperfections d'ordre analytique on relève des erreurs dues à la façon dont les récoltes ont été faites, dues aussi aux opérations préliminaires subies par les échantillons avant l'analyse proprement dite. Les plantes sont récoltées en général suivant les pratiques agricoles, sans précautions spéciales et sans prendre soin de séparer de la racine tout ce qui appartient à la partie aérienne. Parfois les échantillons analysés sont séchés uniquement par simple exposition prolongée à l'air libre ; souvent même on a soumis à l'analyse tout ce qu'on ramasse sur un champ après fauchage, etc...

Ces diverses considérations m'ont conduit à reprendre cette étude en vue de préciser à l'aide d'une méthode de travail rigoureuse, comment varie la composition chimique élémentaire des végétaux au cours de leur développement.

A cet effet j'ai effectué des cultures en pleine terre ; les plantes ont été récoltées par moi-même à cinq époques différentes de leur vie, depuis l'apparition des premières pousses jusqu'à la maturité complète. Chaque récolte, séchée avec précaution, a été analysée à part pour y doser successivement les éléments suivants :

Carbone, hydrogène, azote, sodium, potassium, calcium,

magnésium, soufre, phosphore, silicium, fer, manganèse, et par différence l'oxygène.

Si on distingue les éléments suivant le rôle physiologique qu'ils jouent dans la vie des végétaux, on voit que cette étude s'étend sur tous les éléments à rôle plastique (sauf le chlore), sur deux des principaux éléments catalytiques et enfin sur le silicium.

J'ai déterminé également pour chaque récolte, la teneur en cendres solubles et en cendres insolubles.

Les méthodes de dosage utilisées au cours de ce travail ont été pour la plupart étudiées par Gab. BERTRAND et amenées au plus grand degré de précision qui puisse être atteint à l'heure actuelle. C'est sous la direction de ce savant, au Laboratoire de Chimie biologique de la Sorbonne, à l'Institut Pasteur, que ce travail a été poursuivi.

* * *

La présente étude comprend deux parties :

La première partie est consacrée à l'exposé des principaux travaux effectués précédemment sur l'absorption dans les végétaux des éléments minéraux et sur la variation de la composition chimique des plantes avec l'âge.

La deuxième partie contient l'exposé des méthodes de dosage utilisées au cours de ce travail, l'ensemble des résultats obtenus, et enfin, les conclusions que l'on peut tirer du très grand nombre de dosages effectués dans le but de déterminer l'évolution de la composition chimique des végétaux étudiés au cours de leur développement.

* * *

Je tiens à exprimer ici à M. le professeur Gabriel BERTRAND, mes plus vifs remerciements pour ses précieux conseils et pour le bienveillant accueil qu'il m'a réservé dans son laboratoire. Je le prie de me permettre d'inscrire son nom en tête de ce travail, en témoignage de respectueuse reconnaissance et de profond dévouement.

PREMIÈRE PARTIE

Travaux antérieurs.

APERÇU HISTORIQUE DES RECHERCHES EFFECTUÉES SUR LA COMPOSITION CHIMIQUE DES VÉGÉTAUX

I. — Sur l'utilité des substances minérales dans la vie des plantes.

Les végétaux laissent après leur incinération une partie fixe, les cendres ; ces cendres contiennent la plupart des éléments minéraux qui constituent la partie essentielle de la trame de tous les végétaux.

Bien que l'existence de cette partie incombustible soit connue seulement depuis environ un siècle et demi, il est remarquable que depuis des temps très anciens on ait songé à utiliser des cendres de végétaux comme engrais. Les Indiens de l'Amérique employaient les cendres des feuilles et des tiges de maïs ; de nos jours, les tribus de Madagascar font la culture du riz sur l'emplacement des forêts qui sont anéanties par le feu. Elles ne connaissent pas d'autres moyens de fertiliser leurs terres et quand celles-ci s'épuisent après quelques récoltes, par le même procédé désastreux elles anéantissent de nouvelles étendues boisées.

Dès le commencement du XIX^e siècle le problème de la composition chimique des végétaux retient l'attention des savants. La description détaillée des recherches réalisées jusqu'à nos jours dépasserait le cadre de cette étude. Je retiendrai ici seulement les épisodes les plus remarquables qui intéressent le sujet de cette étude.

On a remarqué tout d'abord que le même poids de divers végétaux ne fournit pas la même proportion de cendres. KIRWAN (53) et RUCKERT (75) observent que les plantes herbacées laissent, à égalité de poids, plus de cendres que les plantes ligneuses.

En 1797 PERTUIS (69), dans le but de stimuler l'industrie de la potasse, qui procédait à cette époque par lessivage des cendres, détermine la quantité de cendres fournies à l'incinération par divers espèces de végétaux. Il remarque ainsi que les feuilles d'un arbre contiennent, à égalité de poids, plus de parties fixes que les branches, et les branches plus que le tronc lui-même.

Un peu plus tard, Th. DE SAUSSURE (79) entreprend une étude plus complète. Il incinère un grand nombre de plantes herbacées et vivaces et dans les cendres obtenues, il détermine les proportions de phosphates terreux, de silice, d'aluminium et d'oxydes métalliques. La présence constante de ces substances dans tous les échantillons analysés l'autorise à s'élever contre l'idée admise à cette époque que les substances minérales contenues dans les végétaux ne sont qu'accidentelles et ne sont pas nécessaires à leur existence.

Ces recherches lui permettent de faire un certain nombre d'observations d'ordre général.

Bien que les méthodes analytiques utilisées par DE SAUSSURE dans ses recherches ne soient pas suffisamment précises au point de vue quantitatif, toutefois les résultats obtenus donnent des indications intéressantes en ce qui concerne le sens du phénomène.

Dans la suite, CHAPTAL (32), BERTHIER (10, 12), BOUSSINGAULT (24, 25, 26), MALAGUTI et DUROCHER (57), GARREAU (43), ZÖLLER (105), FLICHE ET GRANDEAU (42), bien d'autres

encore analysent avec une précision plus grande les cendres de diverses plantes annuelles ou vivaces. Il est remarquable d'ailleurs que leurs résultats confirment le plus souvent les observations de DE SAUSSURE.

Au cours des recherches effectuées vers le milieu du ^{xix}^e siècle, la composition minérale des cendres végétales se précise de plus en plus. On connaissait alors la présence dans les plantes en quantités notables, du calcium, du magnésium, du potassium et du sodium ; l'existence plus ou moins régulière du fer (44), du zinc (27), du cuivre (66), de l'iode et du brome, ensuite du césium et du rubidium décelés à l'aide de l'analyse spectrale (45). Le soufre, le phosphore et la silice étaient également reconnus comme constituants normaux des cendres végétales.

Mais si la présence de la plupart de ces éléments dans la matière végétale était déjà presque certaine, on ignorait encore leur rôle dans la vie des plantes ; beaucoup d'auteurs s'obstinaient à les considérer sans aucun rapport avec le développement des végétaux.

En 1840 LIEBIG (55) confirmant en cela les conclusions formulées par DE SAUSSURE quarante ans avant lui, soutient de nouveau que les substances minérales sont absolument indispensables à la vie des végétaux.

Deux ans plus tard, WIEGEMANN et POLSTORFF (95) ayant entrepris des recherches en vue de vérifier la théorie de LIEBIG, obtiennent des résultats extrêmement intéressants. Ils ont eu l'idée de cultiver parallèlement les mêmes espèces de plantes, d'une part dans du sable lavé à l'acide chlorhydrique, à l'eau, puis calciné, ou bien dans des rognures de platine et, d'autre part, dans les mêmes substrats additionnés de divers sels minéraux.

Tandis que les plantes obtenues dans le premier cas étaient extrêmement chétives et que le poids de leurs cendres dépassait de très peu les matières minérales contenues dans les graines dont ces plantes provenaient, par contre, les plantes venues dans le sable additionné de sels minéraux se sont développées d'une manière normale et le poids de leurs

cendres était environ 10 fois plus grand que celui des cendres des graines semées.

Ces deux auteurs ont démontré ainsi l'utilité absolue des substances minérales pour le bon développement des végétaux.

Dans la suite, SALM-HORSTMAR (78), BOUSSINGAULT, G. VILLE (90), reprennent des expériences analogues. Ils font varier la nature du substrat et la composition des solutions destinées à être additionnées à ce substrat ; les expériences réalisées sont aussi concluantes que celles de WIEGEMANN et POLSTORFF.

Peu après, SACHS (77) et ensuite RAULIN (73), par des expériences multiples et minutieuses arrivent à établir scientifiquement la technique de la culture des végétaux en milieu artificiel. A la suite de leurs travaux se précise le rôle que joue un grand nombre d'éléments dans l'organisation et dans l'évolution des végétaux.

II. — Sur l'absorption des sels minéraux par les végétaux.

Il restait encore à expliquer la nature du phénomène d'absorption des sels minéraux par les plantes.

DE SAUSSURE avait remarqué le premier que les plantes développées dans une dissolution de sels, enlèvent dans un temps déterminé, plus d'eau que de sels. Dans la suite, DE CANDOLLE (31), TRINCHINETTI (87) et d'autres auteurs étudiaient la même question mais de même que DE SAUSSURE, ils constatent les faits sans leur donner une explication satisfaisante.

DEHÉRAIN (34) en s'appuyant sur les expériences de Th. GRAHAM sur la diffusion, explique l'accumulation des principes minéraux dans les organes des végétaux.

Suivant DEHÉRAIN, les expériences de GRAHAM font comprendre comment dans un tissu végétal gorgé de liquide, certaines substances minérales peuvent se déplacer d'un

point à un autre sans qu'il soit nécessaire qu'il y ait en même temps transport d'un liquide qui les entraîne. L'endosmose de l'eau est donc indépendante de l'endosmose des sels, comme DE SAUSSURE l'avait déjà remarqué.

Une substance ne s'accumule dans un tissu qu'autant qu'elle y est immobilisée. Suivant les lois de la diffusion, il tend à s'établir un équilibre entre la concentration du liquide qui baigne les organes d'absorption de la plante et celle du suc qu'ils contiennent ; cet équilibre est constamment détruit par suite de l'immobilisation de la substance en question dans l'organisme du végétal, soit en constituant un sel insoluble, soit par l'élaboration au dépens de cette substance, de principes immédiats insolubles ou colloïdes.

A l'appui des expériences de WALSER (94) et de ses propres recherches, DEHÉRAIN rejette l'idée d'une exosmose régulière des sels par les racines, idée soutenue surtout par DE CANDOLLE.

Sous l'inspiration de DEHÉRAIN, DEMOUSSY (37, 38) étudie plus tard l'absorption par les plantes de quelques sels solubles ; ses conclusions confirment les observations de DEHÉRAIN.

La question de l'existence d'une exosmose régulière par les racines a été posée de nouveau peu après 1900 notamment par WILFARTH, RÖMER et WIMMER (96), SEIDLER et STUTZER (80), CHODAT, MONNIER et DELEANO (33).

G. ANDRÉ (3, 4, 5, 6) à la suite de nombreuses expériences affirme qu'il n'a pu observer d'exosmose des substances minérales pour des cultures se développant dans des conditions normales.

Par des expériences directes sur du maïs cultivé en solutions nutritives à l'abri des microbes, MAZÉ (65) soutient comme possible l'excrétion des substances minérales et organiques par les racines.

Ce problème si intéressant pour la physiologie végétale, n'est certainement pas complètement élucidé et d'autres recherches plus complètes et méthodiques sont à souhaiter.

III. — La variation de la composition chimique des végétaux au cours de leur développement.

Les premiers travaux concernant la variation de la composition chimique des végétaux avec l'âge commencent en 1804. DE SAUSSURE observe le développement de quelques végétaux, détermine le poids des cendres fournies à l'incinération par les récoltes successives de la même plante et fait une analyse sommaire de ces cendres, en y dosant la silice, l'aluminium et les oxydes métalliques tous ensemble, les phosphates terreux, le résidu soluble des cendres.

En étudiant les plantes vivaces, DE SAUSSURE remarque que dans les feuilles la teneur en cendres augmente depuis le moment où elles sortent du bourgeon jusqu'à celui où elles jaunissent et tombent. La proportion de cendres diminue pour les plantes annuelles à mesure que leur végétation avance.

DE SAUSSURE observe également que la proportion de sels alcalins n'augmente jamais sensiblement et qu'elle diminue le plus souvent à mesure que la plante se développe et vieillit sur le même sol. Enfin, il remarque que la plupart des graminées se distinguent des autres plantes par une plus grande proportion de silice.

Plus tard, Mathieu DE DOMBASLE (39), ne tenant compte que du poids de la matière végétale formée, soutient que les plantes herbacées arrivées à la floraison, contiennent la presque totalité des principes qu'elles doivent tirer du sol.

BOUSSINGAULT (24, 25, 26) reprend cette étude et soumet à l'analyse divers échantillons afin de connaître la variation des éléments : carbone, hydrogène, azote et des cendres. BOUSSINGAULT arrive ainsi à des résultats bien différents de ceux de Mathieu DE DOMBASLE, puisque dans son expérience sur le blé, non seulement le poids total de la plante s'est accru jusqu'à la maturité mais encore l'assimilation des matières minérales s'est poursuivie jusqu'à cette époque.

Isidore PIERRE (70, 71) étudie, vingt ans plus tard, le développement du blé en prélevant des échantillons à des intervalles de temps plus rapprochés. Les récoltes effectuées suivant la pratique agricole sont analysées à l'aide des méthodes dont on disposait à cette époque.

Les résultats obtenus par Isidore PIERRE montrent que l'assimilation des principaux éléments marche rapidement jusqu'à la fin de la floraison et cesse à cette époque puisque peu après, à la maturité, on constate une diminution notable dans les quantités contenues dans la masse de matière végétale produite par hectare, bien que le poids total de cette masse ait continué d'augmenter ; à partir de ce moment, non seulement les quantités des principaux éléments continuent à décroître, mais le poids total de la matière végétale produite subit lui-même un abaissement sensible.

La conclusion pratique du travail d'Isidore PIERRE confirme en somme l'opinion de Mathieu DE DOMBASLE, contrairement à celle de BOUSSINGAULT.

En 1874, des nouvelles recherches sur le même sujet furent entreprises par MARIÉ-DAVY (62). Ses résultats, calculés pour un mètre carré de surface, montrent que le potassium atteint son maximum trois semaines avant la floraison. A la floraison, les quantités de cendres, d'acide sulfurique et de calcium, cessent de croître, tandis que la matière végétale sèche, la silice et l'acide phosphorique continuent à augmenter pendant encore quinze jours ; après cela, tout diminue.

Les résultats de MARIÉ-DAVY confirment donc ceux d'Is. PIERRE.

Quelques années plus tard MAQUENNE (59) publie les résultats de ses recherches sur la végétation de certaines plantes oléagineuses et de l'avoine. Les récoltes effectuées à plusieurs époques de végétation sont analysées pour y doser le carbone, l'hydrogène et l'azote ; les cendres sont aussi déterminées.

Les résultats de ces analyses montrent que depuis le début de la croissance et jusqu'à la maturité, l'avoine s'enrichit en oxygène, tandis que les plantes oléagineuses s'enrichissent en carbone.

MAQUENNE trouve l'explication de ces particularités dans l'accumulation de l'amidon, pour l'avoine, et dans l'accumulation des substances grasses, pour ce qui concerne les plantes oléagineuses.

En étudiant le lin, cet auteur a montré que la proportion de cendres est à peu près la même dans la partie supérieure de la tige et dans la partie inférieure. Il n'en est plus de même pour les matières azotées ; elles sont plus abondantes vers les inflorescences, et cela, d'autant plus que les fruits approchent davantage de la maturité.

DEHÉRAIN et MEYER (36) ont également mis ce fait en évidence pour le blé.

En collaboration avec BRÉAL, DEHÉRAIN (35) étudie les lois générales de la croissance et de la maturation des plantes herbacées. Il résulte de cette étude que la maturation est accompagnée d'une perte de matière sèche suivie ou non d'une recrudescence de la végétation ; dans certains cas il y a même à cette époque, augmentation du poids de la plante.

Quant à l'azote et aux cendres, les auteurs remarquent que les proportions de ces substances pour cent grammes de matières sèches sont maxima au début de la croissance et diminuent à peu près régulièrement jusqu'à la mort de la plante.

Plus tard BERTHELOT et ANDRÉ (8) reprennent les recherches relatives à la marche générale de la végétation et, en opérant sur des plantes autres que celles étudiées par DEHÉRAIN et BRÉAL, trouvent que pour cent grammes de matières sèches, les proportions des éléments sont maxima au moment de la floraison, les quantités totales augmentant continuellement. Ces auteurs essayent même, en partant de cinq données analytiques, d'établir une « équation chimique de la plante ».

A la même époque H. JOULIE (51) publie ses études sur les céréales. En les analysant à deux moments de leur végétation, à la floraison et à la maturité, JOULIE trouve que d'une manière générale ces plantes sont à la maturité moins riches en tous les éléments minéraux, bien qu'il y ait une augmentation du poids de la matière végétale sèche, entre les deux époques.

VILLARD et BŒUF (89) ont étudié comparativement une prairie naturelle, une luzernière et un mélange de sainfoin et de luzerne. Les résultats de leurs études concordent avec ceux de DEHÉRAIN et BRÉAL.

Peu après, MONVOISIN (67) étudie les variations du poids des cendres et de l'azote durant la végétation de quelques plantes fourragères. Il trouve que plus les plantes vieillissent, plus la proportion des cendres diminue, mais cette diminution est plus lente chez les légumineuses que chez les graminées. La teneur maxima d'azote se trouve toujours dans le jeune âge, avant la floraison pour les graminées, tantôt à la floraison tantôt avant chez les légumineuses.

Dans la suite, d'autres auteurs, notamment WILFARTH, RÖMER et WIMMER (96) ; CHODAT, MONNIER et DELEANO (33), étudient l'accroissement des végétaux et l'absorption des matières minérales. Après avoir constaté, comme autrefois l'avait remarqué Is. PIERRE et JOULIE, que les plantes perdent durant leur développement, suivant l'espèce cultivée, des quantités variables d'éléments minéraux indispensables, ces auteurs soutiennent l'existence d'une exosmose régulière des sels minéraux par les racines, ainsi qu'il est déjà rappelé plus haut.

Quelques années plus tard G. ANDRÉ (3, 4, 5, 6) étudie l'évolution des principes minéraux et de l'azote chez quelques plantes annuelles est plus particulièrement de l'orge. Les résultats de ces recherches montrent une teneur maxima pour le sodium et le potassium au début de la floraison et leur diminution progressive pendant le reste de la végétation, les autres éléments s'accumulant dans la plante jusqu'à la maturité complète.

John BURD (29) divise la végétation de l'orge en trois étapes : la première est caractérisée par la teneur élevée en azote et en potassium (début de la croissance), la deuxième par une diminution de ces deux éléments et du calcium, et enfin une troisième caractérisée par l'arrêt presque complet de l'absorption (maturité).

J. G. MASCHHAUPT (63) étudie la pomme de terre, tubercules

et parties aériennes, et trouve que cette plante contient à la maturité plus d'azote et de matières minérales qu'à une époque antérieure ; il conclut qu'il n'y a pas eu retour à la terre, des substances nutritives.

En 1922, Gab. BERTRAND et M^{me} ROSENBLATT, étudiant la répartition du manganèse dans l'organisme des plantes supérieures et la variation de la teneur des feuilles avec l'âge, trouvent que les feuilles, les organes floraux et les graines sont les parties du végétal les plus riches en manganèse. Très élevée dans les feuilles à l'état jeune, la proportion de manganèse diminue durant leur développement et augmente à la fin (20, 21).

A. RIPPEL (74) montre que les jeunes plantes d'*Helianthus annuus* absorbent de préférence l'azote, le phosphore et le potassium, tandis que les vieilles plantes absorbent plus particulièrement le calcium, le magnésium, le soufre et le silicium, éléments moins mobiles que les premiers.

En 1928, A. ZBOROWSKY (104) et peu après V. HÖNL (48) déterminent la teneur de quelques plantes en carbone et en azote, de même que la chaleur de combustion dégagée à la bombe calorimétrique par un gramme de matière sèche. Le nombre des calories dégagées, ainsi que les proportions de carbone et d'azote, diminuent à mesure que la végétation avance, moins vite chez les légumineuses que chez les céréales.

Narasimha ACHARYA (1) étudiant le *Sorghum vulgare*, trouve que les éléments minéraux sont en abondance dans la plante peu avant la floraison. Pour un nombre déterminé de plantes, les quantités des constituants minéraux augmentent jusqu'à la maturité, après, les quantités absolues de chaque élément pris à part diminuent d'une façon plus ou moins importante.

Frank KNOWLES et Y. E. WATKIN (54) remarquent l'accroissement continu du poids total du phosphore et de l'azote dans le blé jusqu'à la maturité, époque où seulement le poids total de l'azote subit une faible diminution.

Etudiant l'absorption, en fonction du temps, de l'azote, du phosphore, du potassium et du calcium chez un certain

nombre de plantes, H. WAGNER (91, 92, 93) remarque que la formation des matières sucrées dans le maïs et la betterave à sucre, ainsi que la formation des substances grasses dans les fruits des plantes oléagineuses est accompagnée d'une assimilation importante de calcium. WAGNER attribue au calcium un rôle particulièrement favorable¹ dans le transport et l'accumulation des matières sucrées et des substances grasses dans les plantes.

En dehors de ces travaux dans lesquels on détermine le développement et la composition chimique de chaque espèce végétale, des recherches semblables ont été conduites ces vingt dernières années, surtout en Angleterre et en Amérique, sur l'ensemble des herbes qu'on ramasse sur une prairie après fauchage (2, 28, 46, 47, 52, 58, 76, 84, 85, 86, 88, 97). Ces études sont moins précises que les premières et sont exécutées pour servir à l'agriculture.

Pour déterminer la valeur nutritive de l'herbage des prairies, naturelles ou cultivées, des échantillons sont prélevés par des fauchages à des courts intervalles de temps.

D'un fauchage à l'autre, la pâture se recouvre d'un herbage constitué de nouvelles pousses ; ce système de fréquents fauchages a comme effet de maintenir la végétation dans un état de jeunesse relativement persistante. Ce même effet est obtenu sur des parcelles de champs contiguës aux premières et à l'intérieur de la même prairie, par un autre moyen ; on fait paître les herbes par du bétail successivement à des intervalles de temps aussi rapprochés que les intervalles entre les fauchages des champs contigus.

On observe d'une part comment se comporte dans ces conditions le bétail soumis à l'expérience et, d'autre part, on analyse le foin obtenu par fauchage. On y détermine surtout la teneur en azote, en calcium, en phosphore, en fibre et en matières grasses ; les matières protéiques sont calculées en multipliant la teneur en azoté par 6,25.

Il est évident que les résultats analytiques ne sont valables que pour le mélange mal défini des diverses plantes dont se

compose l'herbage soumis au traitement ci-dessus indiqué.

La conclusion qui résulte en confrontant les deux observations, développement des animaux d'une part et composition chimique de l'herbage d'autre part, est que cet herbage conserve durant la saison entière une richesse presque constante en matières protéiques et en substances minérales, ainsi qu'une haute valeur nutritive.

FAGAN (40, 41) WOODMAN (98, 103) et SHUTT (81-83) qui ont surtout étudié ce problème, recommandent de faire pâturer les herbes par du bétail, par rotation, ou de les faucher à des intervalles de temps de trois semaines. La valeur nutritive de l'herbage ainsi obtenu est plus haute que celle d'un herbage qu'on laisse pousser librement jusqu'à un stade de végétation plus avancé.

DEUXIÈME PARTIE

Recherches personnelles

Sur la présence du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du soufre, du phosphore, du sodium, du potassium, du calcium, du magnésium, du fer, du manganèse et du silicium dans les végétaux à diverses époques de leur développement.

Comme nous venons de le voir dans l'historique des recherches effectuées précédemment, la plupart des auteurs se sont contentés de doser dans les végétaux un nombre assez restreint d'éléments. De la sorte, on ne pouvait se faire qu'une idée approchée de la composition chimique d'une espèce végétale, en recueillant pour celle-ci les résultats obtenus séparément par plusieurs expérimentateurs. Comme la composition chimique d'une plante varie durant son évolution, il est absolument essentiel, pour obtenir des résultats analytiques comparables, que tous les dosages soient effectués sur des échantillons provenant d'une même récolte de l'espèce végétale considérée ; il sera alors possible d'établir la composition chimique qu'elle avait au moment où la récolte a été pratiquée.

Je me suis proposé d'établir ici la composition chimique d'un certain nombre de plantes en tenant compte de cette remarque. A cet effet j'ai effectué toutes les analyses à plusieurs époques de développement de la même plante, afin

de saisir le sens et l'importance des changements qui s'y produisent.

Les méthodes de dosage que j'ai adoptées sont choisies parmi les plus précises. Elles ont été soumises préalablement à une vérification rigoureuse et je les ai modifiées lorsque cela a été nécessaire.

En général, dans la pratique, lorsqu'on dispose de plusieurs méthodes d'analyse d'une précision voisine, on a tendance à choisir celle qui est la plus rapide, même si elle n'est pas rigoureusement la plus précise, surtout lorsqu'il s'agit d'effectuer un très grand nombre de dosages ; on adopte alors la méthode qui permet d'effectuer le travail en série.

Tel n'a pas été le cas dans cette étude où j'ai tenu à effectuer les très nombreux dosages qu'elle comportait sans tenir compte de ces considérations. C'est ainsi que, par exemple, pour doser l'azote, j'ai systématiquement laissé de côté la méthode de Kjeldahl, d'usage courant dans les laboratoires, précisément parce qu'elle permet d'analyser simultanément un grand nombre d'échantillons. Je lui ai préféré, parce que beaucoup plus précise, la méthode de DUMAS, selon la technique de la micro-analyse établie par PREGL.

Seront décrites, d'abord, les méthodes d'analyse utilisées pour le dosage des éléments plastiques et ensuite celles qui m'ont permis de doser les éléments catalytiques.

L'exposé de certaines méthodes, dont j'ai étudié et modifié la technique opératoire, est suivie d'une brève critique des méthodes utilisées antérieurement. Il en est de même pour les méthodes que je suis le premier à appliquer dans l'étude de l'évolution de la composition chimique élémentaire des végétaux pendant leur développement.

CHAPITRE I

MÉTHODES DE DOSAGE UTILISÉES DANS CE TRAVAIL

I. — Récolte et préparation des échantillons à analyser.

Au cours de cette étude j'ai analysé, durant leur développement, quatre espèces végétales dont trois espèces à végétation annuelle et une espèce à végétation bisannuelle.

Toutes les plantes ont été semées et cultivées par moi-même sur des parcelles contiguës d'un terrain appartenant à l'Institut Pasteur.

Dès les premières pousses il a été procédé à un éclaircissement du champ, en arrachant quelques-unes des plantes trop contiguës, afin que les plantes admises à se développer soient situées le plus possible, à des distances égales.

Les récoltes ont été faites le matin par temps sec, entre 8h. et 9h. A cet effet, on commence par soulever la terre au pied de la plantule qu'on veut récolter, ensuite on arrache celle-ci avec précaution. En quelques minutes on arrive à retirer ainsi cinq plantules. A l'aide d'un ciseau de nickel on sépare alors la partie aérienne de la racine : les cinq parties aériennes ainsi détachées sont pesées immédiatement pour connaître leur poids à l'état frais. On récolte de la même manière un nouveau lot de cinq plantes et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtienne un échantillon constitué d'un nombre déterminé de plantes, dont la matière soit assez importante pour satisfaire aux besoins des diverses analyses à effectuer.

Les parties aériennes récoltées et pesées, sont lavées d'abord à l'eau courante et ensuite à l'eau distillée pour les débarrasser des traces de poussière ou de terre dont la présence fausserait les résultats. Après égouttage, on les sèche entre plusieurs feuilles de papier filtre, de façon à éviter la contamination par les poussières de l'air ambiant, d'abord dans une chambre thermostat et ensuite dans une étuve à 105° jusqu'à poids constant.

La matière sèche obtenue est alors réduite en menus morceaux, par simple pression entre les doigts. Une partie de cette matière est convertie en une poudre assez fine et une autre partie est réduite en poudre impalpable à l'aide d'un petit moulin spécial. L'échantillon se trouve ainsi réparti sous trois états ; poudre grossière, poudre assez fine et poudre impalpable.

La poudre grossière, qui n'a été en contact avec aucun appareil métallique, sert pour le dosage du fer et du manganèse. Je l'ai également utilisée pour le dosage du silicium.

La poudre végétale assez fine a servi pour effectuer le dosage des éléments suivants : sodium, potassium, calcium, magnésium, soufre et phosphore. Son homogénéité était assez remarquable ; je l'ai constaté maintes fois au cours de diverses analyses (voir à ce sujet les résultats des dosages du sodium et du potassium effectués en double, p. 47 et 48).

Pour l'analyse organique et pour le micro-dosage de l'azote j'ai utilisé la poudre la plus fine. Presque tous ces dosages ont été effectués en double et j'ai constaté à cette occasion qu'elle avait une composition parfaitement constante. Les résultats de quelques dosages d'azote faits en double et qui se trouvent reproduits page 40 sont édifiants à ce propos.

Les racines débarrassées de la terre adhérente, sont à leur tour lavées à l'eau courante, brossées, rincées à l'eau distillée, séchées par pression entre plusieurs feuilles de papier filtre et pesées, ce qui donne leur poids à l'état frais. La dessiccation est faite comme pour les parties aériennes, d'abord dans une chambre thermostat et ensuite à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant.

Tous les échantillons sont conservés dans des flacons de verre convenablement bouchés.

J'ai pratiqué les récoltes successives à des époques telles que la plante soit dans les états suivants :

1^o Plante portant les cotylédons et les deux premières feuilles.

2^o Plante à l'apparition des premiers bourgeons floraux.

3^o Plante en pleine floraison.

4^o Plante portant les graines encore à l'état vert (début de maturation).

5^o Plante portant des graines à l'état sec (à la maturité complète).

Les parties aériennes sont analysées pour y doser toute la série des éléments que j'ai déjà indiqués.

* * *

Au cours de ce travail j'ai étudié la composition chimique élémentaire de quatre espèces végétales appartenant à quatre familles botaniques, à savoir :

Crucifères : Colza (Brass. nap. ol., D. C.) récolté pendant les années 1931 et 1932.

Graminées : Avoine (*Avena sativa*) récolté pendant l'année 1932.

Polygonacées : Sarrazin (*Polyg. fag. L.*) récolté pendant l'année 1932.

Légumineuses : Luzerne (*Médic. sativa L.*) récolté pendant les années 1932 et 1933.

Pour chacune des plantes ci-dessus j'ai analysé durant leur végétation plusieurs récoltes successives. Tous les détails concernant les récoltes ainsi que tous les résultats des dosages se trouvent assemblés dans les chapitres affectés à cet effet, un peu plus loin.

II. — Détermination des cendres.

CENDRES INSOLUBLES, CENDRES SOLUBLES, CENDRES TOTALES.

Pour déterminer la proportion de cendres que renferment les végétaux, ainsi que pour effectuer certains dosages (Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Si) on procède à l'incinération des échantillons. On réalise cette opération dans des capsules de platine, de quartz ou de porcelaine, suivant le cas.

La capsule de platine est absolument indispensable à la préparation des cendres où l'on veut doser le silicium, le calcium et le magnésium ; elle est facultative pour la préparation des cendres destinées à servir au dosage du sodium et du potassium où on peut la remplacer avantageusement par une capsule de quartz.

L'incinération est faite à basse température dans un four à moufle chauffé au rouge sombre tout au plus, afin d'éviter d'une part la fusion des sels qui pourraient englober le charbon et l'empêcher de brûler, et d'autre part, pour éviter la perte des sels de sodium et de potassium par volatilisation.

Lorsque la plus grande partie du charbon a disparu par combustion, on lave le produit charbonneux à l'eau chaude à plusieurs reprises, par délayage, repos, décantation et filtration, pour enlever la presque totalité des sels solubles. Le liquide filtré est mis à part tandis que le résidu est séché avec le filtre, puis chauffé de nouveau au four à moufle jusqu'à disparition du charbon. Les cendres sont épuisées à l'eau chaude comme précédemment et le filtrat est réuni au précédent. On sèche le filtre et le résidu, on calcine au four à moufle et on pèse après refroidissement. On obtient ainsi le poids des cendres insolubles dans l'eau chaude.

La totalité du filtrat précédemment obtenu est évaporée à sec dans une capsule de platine, au bain-marie, ensuite séchée à l'étuve à 125-130°. On pèse le résidu ; son poids représente la totalité des cendres solubles dans l'eau chaude.

En additionnant les poids des deux sortes de cendres on obtient le poids des cendres totales.

Quand on s'intéresse uniquement à la totalité des cendres, on effectue l'évaporation du filtrat renfermant les sels solubles dans la capsule même où a eu lieu l'incinération et où se trouvent les cendres insolubles.

On obtient ainsi, par une seule pesée, le poids des cendres totales.

III. — Dosage du carbone et de l'hydrogène.

Pour doser le carbone et l'hydrogène dans mes échantillons, j'ai utilisé la méthode de GAY-LUSSAC, en suivant la technique mise au point par Gabriel BERTRAND. J'ai adapté cette technique à l'analyse des végétaux.

Quand il s'agit de doser le carbone dans la matière si complexe que constitue un tissu végétal, certaines précautions particulières sont nécessaires. En effet, il faut remarquer qu'une partie du carbone qu'on veut doser reste combinée aux éléments constitutifs de la matière végétale à l'état de carbonates. Le carbone engagé sous cette forme échappe alors à l'analyse et on trouve ainsi des résultats inexacts.

Afin d'éviter cette cause d'erreur j'ai préféré mélanger intimement la prise d'essai sous forme de poudre impalpable non seulement avec du bioxyde de cuivre mais encore avec du bichromate de potassium, également en poudre fine. Celui-ci fond au cours de la combustion et le bichromate de potassium à l'état liquide acquiert la possibilité d'imprégner toute la masse constituée par le mélange de la substance et du bioxyde de cuivre en poudre. Dans ces conditions, l'oxydation de la substance à analyser est complète et tout le bioxyde de carbone est déplacé des carbonates, ainsi que le montrent les expériences de contrôle.

a) CONTRÔLE DE LA TECHNIQUE DE DOSAGE
DU CARBONE.

Pour contrôler la méthode utilisée et pour me rendre compte de l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales, j'ai procédé à l'analyse d'une substance de composition parfaitement connue. Mon choix s'est porté sur le bitartrate de potassium, parce que ce sel semble réaliser très sensiblement, pendant la combustion, les conditions même de l'analyse d'une poudre d'origine végétale. En effet, à l'incinération, le bitartrate de potassium laisse un résidu incombustible très alcalin, particularité que présentent également les cendres d'origine végétale, résidu capable de retenir pendant la combustion une partie du carbone à l'état de carbonate.

J'ai purifié soigneusement le bitartrate de potassium par une série de trois recristallisations.

D'après la formule $C^4 H^5 O^6 K$, ce sel contient 25,52 % de carbone.

Voici les résultats que j'ai obtenus :

Prise d'essai $C^4 H^5 O^6 K$ mgr.	Poids de carbone contenu dans la prise d'essai mgr.	Poids de CO_2 recueilli mgr.	Poids de carbone retrouvé mgr.	Erreur sur le carbone	
				absolue	%
227,6	58,08	212,4	57,92	— 0,16	— 0,27
246,0	62,78	229,5	62,58	— 0,20	— 0,31
191,6	48,89	179,1	48,84	— 0,05	— 0,12
289,1	73,77	270,0	73,63	— 0,14	— 0,19

On constate que l'erreur, en moins, commise sur la détermination du carbone ne dépasse pas 0,3 %, erreur qui est bien de l'ordre de grandeur de celles que l'on admet généralement pour le dosage du carbone dans les substances composées uniquement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

b) TECHNIQUE UTILISÉE POUR DOSER LE CARBONE.
ET L'HYDROGÈNE DANS LES VÉGÉTAUX.

Les échantillons prélevés et préparés avec les précautions déjà indiquées plus haut (p. 29), sont d'abord séchés et ensuite mis sous la forme d'une poudre très fine et impalpable, à l'aide d'un petit moulin. Cette poudre est conservée dans un flacon bouché qui séjourne pendant les dosages, dans la cage même de la balance où l'on effectue les pesées.

On prépare le bichromate de potassium nécessaire, en faisant fondre une certaine quantité de cristaux bien purs.

Après refroidissement de la masse fondue, on pulvérise celle-ci finement dans un mortier en verre et on conserve la poudre ainsi que tous les oxydes de cuivre nécessaires, dans des matras en verre à l'intérieur d'une étuve chauffée à 100° C.

Au moment de l'analyse, une quantité de poudre végétale d'environ 250 mg. est pesée dans un tout petit tube à essai introduit dans un pèse-filtre bouché à l'émeri. Immédiatement après on pèse une deuxième prise d'essai (prise d'essai n° 2) avec la même précaution.

La première prise d'essai, mélangée avec du bichromate de potassium sec en poudre et avec de l'oxyde de cuivre en poudre, sert au dosage du carbone et de l'hydrogène. La deuxième prise d'essai est introduite dans un dessiccateur où on fait le vide et que l'on maintient quelques heures à une température de 40° dans un thermostat. Ensuite on pèse le filtre contenant la substance jusqu'à poids constant. On détermine de cette manière l'humidité de l'échantillon au moment même de l'analyse.

Pour la combustion j'ai utilisé des tubes fermés, en verre peu fusible, étirés en forme de baïonnette. Toutes les précautions d'usage ont été prises pour la préparation et la conservation des oxydes de cuivre nécessaires. L'oxygène pur est préparé au cours de l'analyse par l'action de l'eau sur l'oxylithe. On obtient dans ces conditions un oxygène exempt de CO² puisqu'il se dégage d'un milieu fortement

alcalin. Il est d'ailleurs lavé avant d'entrer dans le tube à combustion, à travers une solution de potasse caustique, un tube en U contenant de la chaux sodée et deux autres tubes contenant de l'acide sulfurique concentré.

Une deuxième série de tubes laveurs identiques aux premiers et disposée de la même façon, sert à purifier l'air destiné à déplacer l'oxygène des tubes absorbeurs, avant leur pesée à la fin de la combustion. Le dispositif, dû à Gabriel BERTRAND, permet de changer instantanément le courant des gaz, suivant les nécessités de chaque phase de l'analyse.

Les gaz de la combustion passent, comme dans la technique classique, d'abord dans un tube renfermant de l'acide sulfurique, ensuite à travers une solution de potasse caustique contenue dans un tube Liebig, puis un tube contenant de la chaux sodée et enfin un deuxième tube à acide sulfurique.

Toutes les pesées des échantillons et des tubes absorbeurs ont été faites à 1/10 de milligramme près, par double pesée. A la fin de l'analyse, l'humidité que la prise d'essai n° 1 avait au moment même où on l'introduisait dans le tube à combustion, (humidité que l'on obtient par calcul à partir du taux d'humidité déterminé sur la prise d'essai n° 2) est déduite premièrement du poids de la prise d'essai n° 1, pour obtenir le vrai poids de la matière sèche analysée, et deuxièmement du poids de l'eau recueillie, pour obtenir cette fois le poids de l'eau formée pendant la combustion.

Comme on l'a déjà vu, la précision atteinte dans les dosages effectués suivant cette technique est d'environ 0,3 % du carbone trouvé.

Les auteurs qui ont dosé précédemment le carbone dans les végétaux, sont peu nombreux.

BOUSSINGAULT (26) brûle la matière sèche dans un courant d'oxygène sec et détermine ainsi la majeure partie du carbone engagée dans la substance végétale. A la fin de l'analyse il pèse les cendres restées dans la nacelle et il y détermine le gaz carbonique retenu sous forme de carbonates. Le

poids du carbone de la prise d'essai est obtenu en additionnant les poids du carbone trouvés dans ces deux déterminations successives.

MÜNTZ (68) et BERTHELOT (8) utilisent la même méthode pour doser le carbone. MÜNTZ libère le gaz carbonique retenu dans les cendres à l'état de carbonate à la fin de la combustion, en traitant les cendres par de l'acide antimonique en présence d'un peu d'eau. Après évaporation à siccité et une légère calcination à base température, il pèse le résidu et par différence avec le poids des cendres il obtient le poids du gaz carbonique libéré.

BERTHELOT dose autrement le gaz carbonique des cendres. Il traite les cendres par l'acide chlorhydrique étendu, dans un ballon mis en communication avec un flacon laveur contenant de l'acide sulfurique et deux autres flacons tarés, l'un renfermant de la potasse en solution, l'autre de la potasse à l'état solide. Le gaz carbonique qui se dégage par l'action de l'acide sur les cendres est ainsi séché et ensuite absorbé dans la potasse.

Ainsi le dosage du carbone à l'aide de ces méthodes comporte deux opérations distinctes : la combustion proprement dite et le dosage du gaz carbonique dans les cendres restantes après la combustion. Il est à remarquer que dans ces conditions l'erreur expérimentale est augmentée par la multiplication des opérations à effectuer, et encore il est à craindre qu'une partie non négligeable des cendres soit emportée par le courant d'oxygène qui passe dans le tube durant la combustion.

MAQUENNE (59) opère d'une manière beaucoup plus précise. Il effectue le dosage du carbone en une seule opération en soumettant à l'analyse la substance végétale additionnée préalablement d'une certaine quantité d'acide tungstique.

En 1928 ZBOROVSKY (104) et peu après V. HÖNL (48), utilisent la bombe calorimétrique pour doser le carbone dans les végétaux. Les gaz de combustion sont conduits, à la sortie de la bombe calorimétrique, d'abord sur du chlorure

de calcium pour être desséchés et ensuite sont absorbés dans la potasse.

Les auteurs ont obtenu de très bons résultats avec des substances organiques ne contenant que du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène (acide benzoïque, saccharose, naphthaline).

Mais ainsi qu'il vient d'être observé plus haut, une partie de carbone est retenue dans les cendres à l'état de carbonates divers. A la bombe calorimétrique on ne peut pas décomposer les carbonates pour libérer le gaz carbonique qui y est engagé, de telle sorte que le carbone correspondant échappe à l'analyse. Cette perte est plus grande encore lorsque l'expérience se fait en présence de nitrate de potassium que les auteurs ont intentionnellement additionné à la matière végétale au moment de la préparation de la pastille et dans le but de favoriser la combustion de la matière organique. On conçoit que le potassium introduit sous cette forme vient augmenter la proportion de carbonate qui se formera pendant la combustion de la matière.

Il est à remarquer également que la faible quantité de gaz carbonique qui résulte de la combustion de la prise d'essai, se trouve mélangée à un volume considérable d'oxygène. Pour une absorption totale du gaz carbonique par la potasse il faut, tout au contraire, éviter la dilution de ce gaz, car dans ces conditions une partie du gaz carbonique traverse la potasse sans y être retenue. C'est d'ailleurs pour cette raison que j'ai préféré doser le carbone dans des tubes de verre fermés, quoique l'analyse demande une préparation beaucoup plus minutieuse et plus laborieuse que l'analyse pratiquée dans un tube de verre ouvert ; la combustion en tube ouvert présente le désavantage de trop diluer les gaz de combustion.

IV. — Dosage de l'azote.

Pour doser l'azote dans les végétaux j'ai utilisé la méthode DUMAS, en adoptant la technique de la micro-analyse éta-

blie par PREGL (72). Pour adapter cette technique au dosage de l'azote dans les matières d'origine végétale, j'ai introduit une légère modification.

PREGI a établi la méthode pour doser l'azote dans les substances organiques pures. Dans ce cas, une prise d'essai de quelques milligrammes seulement est suffisante pour effectuer une analyse avec des résultats très précis, une substance organique pure étant un corps parfaitement homogène. Ce n'est pas le cas lorsqu'il s'agit de doser l'azote dans les végétaux ; la poudre qu'on obtient ici n'est pas d'une homogénéité parfaite, même si elle est très fine et impalpable.

Ces considérations m'ont amené à augmenter le poids de la prise d'essai. Les expériences que j'ai faites à cet effet ont montré qu'on peut obtenir des résultats exacts en soumettant à l'analyse une prise d'essai d'environ 20 mg.

Le dégagement des gaz combustibles et d'azote est dans ce cas beaucoup plus important que lorsqu'on utilise seulement quelques milligrammes de substance organique. De ce fait, j'ai choisi un tube à combustion d'un diamètre intérieur légèrement plus grand que celui recommandé par PREGL (11 mm. au lieu de 8 mm.). Dans ces conditions les gaz sont obligés de passer sur des quantités assez importantes de bioxyde de cuivre et de cuivre réduit en fils, fait qui assure d'une part l'oxydation complète du carbone et d'autre part la réduction totale du protoxyde d'azote qui peut se former pendant la combustion. L'azote dégagé est recueilli dans un microazotomètre de précision pouvant contenir jusqu'à 4 cm³ de gaz.

A part ces légères modifications j'ai suivi, pour le reste de l'analyse, toutes les précautions indiquées par PREGL.

Pour effectuer les pesées je me suis servi de la microbalance apériodique de LONGUE d'une portée de 20 gr., sensible au 1/1000^e de mgr.

Afin de me rendre compte de la précision des dosages effectués dans ces conditions, j'ai soumis à l'analyse plusieurs

substances azotées pures. Voici un exemple des résultats obtenus dans ces essais de contrôle.

Substance	Prise d'essai centièmes de milligr.	Volume d'azote recueilli cm ³	Valeur du coeffic. (1)	Azote pour cent		Erreur	
				trouvé	théorie	absolue	%
Oxalate d'am- monium...	910,8	1,582	0,909	19,75	19,70	+ 0,05	+ 0,25
Caféine	572,0	1,451	0,914	29,00	28,86	+ 0,14	+ 0,48
Nicotine	451,9	0,686	0,914	17,35	17,28	+ 0,07	+ 0,40

De tous les essais analogues j'ai pu déduire que l'erreur ne dépasse pas 0,5 % de l'azote dosé.

Pour déterminer le poids de poudre végétale à employer sans être gêné par le fait qu'elle n'est pas parfaitement homogène, j'ai effectué plusieurs analyses d'un même échantillon avec des quantités croissantes de matière.

Voici quelques-uns des résultats de ces analyses.

Plante analysée	Prise d'essai centièmes de milligr.	Humidité de l'échantillon %	Volume d'azote recueilli cm ³	Valeur du coefficient (1)	Azote % de matière sèche
Avoine récoltée le 12. 7. 1932	1930,6	5,03	0,500	0,881	3,005
do	4340,7	—	1,108	0,895	3,008
Colza récolté le 2. 6. 1932 ...	2120,1	6,63	1,105	0,906	6,325
do	3819,6	—	1,990	0,909	6,340
Sarrasin récolté le 18. 6. 1932	2153,8	5,18	0,886	0,898	4,872
do	2351,2	—	0,980	0,887	4,876

Les résultats consignés dans ce tableau montrent qu'une prise d'essai d'environ 20 mgr. de poudre végétale est suffisante pour effectuer un dosage exact d'azote.

V. — Dosage du soufre.

Pour le dosage de ce métalloïde j'ai utilisé la méthode proposée autrefois par Gab. BERTRAND pour le dosage du

(1) Coefficient utilisé pour ramener les gaz à 0° et 760 mm. de pression.

soufre contenu dans le caoutchouc vulcanisé (15). Cette méthode a été appliquée récemment par Gab. BERTRAND et L. SILBERSTEIN (22) au dosage de cet élément dans les végétaux.

Suivant cette technique, le dosage du soufre s'effectue directement sur l'échantillon à l'état frais ou à l'état sec.

La destruction de la matière organique et l'oxydation du métalloïde est accomplie d'abord par voie humide à l'aide de l'acide nitrique fumant, ensuite par voie sèche dans une fusion alcaline.

Dans les opérations à effectuer durant le dosage il faut éviter l'emploi de tout appareil chauffé au gaz d'éclairage (bain-marie, four, brûleur) car les produits de combustion du gaz renferment du soufre, ce qui peut fausser les résultats.

L'analyse est conduite de la façon suivante :

Environ 1 gr. de plante à l'état sec, (10 gr. à l'état frais) est traité par 15 cm³ d'acide nitrique fumant exempt d'acide sulfurique, dans un ballon de 150 cm³. L'acide est versé en une seule fois en agitant immédiatement pour que toute la substance soit imbibée d'acide ; on évite ainsi une réaction par trop vive qui peut enflammer la matière organique. Lorsque, après quelque temps de contact à la température ordinaire, la plupart de la matière végétale a été détruite, on chauffe au bain-marie électrique jusqu'à dissolution complète, ensuite on transvase le contenu du ballon dans une capsule de porcelaine et on l'évapore au bain-marie jusqu'à consistance pâteuse.

L'acidité de la masse est neutralisée par un volume déterminé d'une solution de carbonate de sodium ; on ajoute au mélange un volume de solution égal à celui qui a servi à neutraliser l'acidité. Enfin on transvase le tout dans un creuset de nickel ; par évaporation au bain-marie, son contenu est amené à la consistance d'une pâte épaisse.

Au résidu de l'évaporation on ajoute 10 gr. d'un mélange équimoléculaire de nitrate de potassium et de carbonate de sodium et le tout est chauffé au four électrique jusqu'à fusion complète. Après refroidissement, la masse est reprise

à l'eau et la solution, additionnée d'un excès de 20 cm³ d'acide chlorhydrique, est évaporée à siccité. On ajoute à nouveau 15 cm³ d'acide chlorhydrique et l'on évapore une seconde fois à siccité.

Finalement on reprend par l'eau acidulée et on précipite le soufre à l'état de sulfate de baryum.

Il est à rappeler ici que l'on a presque toujours eu tort de pratiquer le dosage du soufre dans la partie minérale qui reste après l'incinération des plantes. La proportion de soufre dans les cendres est toujours très inférieure à celle qui existe dans la plante. Des analyses comparatives effectuées d'une part sur l'échantillon à l'état sec, suivant la méthode que j'ai utilisée, et d'autre part sur les cendres, ont montré des différences considérables. Malgré les soins pris pour l'incinération, les pertes s'élèvent de 43,8 à 76,1 % pour certaines plantes (22).

En général, les auteurs qui ont étudié précédemment l'évolution du soufre dans les plantes pendant leur végétation, ont dosé cet élément dans les cendres. Leurs résultats sont en conséquence inexacts. Toutefois, BERTHELOT et ANDRÉ (9) ont obtenu des résultats meilleurs en utilisant une méthode qui consiste à brûler la matière végétale sèche dans un tube à combustion rempli de carbonate de soude et chauffé au rouge sombre. L'oxydation de la substance est accomplie, à la fin de l'analyse, en faisant passer dans le tube un courant d'oxygène. Le soufre passe à l'état de sulfate de sodium. On dissout dans l'eau la masse alcaline et dans cette liqueur on précipite le soufre par le chlorure de baryum.

Toutefois cette méthode n'est pas rigoureusement exacte. Il est extrêmement rare que le verre du tube à combustion ne soit pas attaqué par le carbonate de soude chauffé au rouge. Il résulte de ce fait une surcharge en soufre due aux sulfates qui entrent très souvent dans la composition du verre. Lorsqu'il s'agit d'opérer sur des matières aussi pauvres en soufre que celles d'origine végétale, cette erreur est loin

d'être négligeable. Enfin, il n'est pas facile de recueillir quelques milligrammes de sulfate de baryum, d'un volume de liquide si important et si chargé de sels, tel qu'on l'obtient en dissolvant toute la masse alcaline dont était rempli le tube à combustion.

Les résultats que BERTHELOT et ANDRÉ ont obtenus à l'aide de cette méthode sont, il faut le remarquer, beaucoup plus précis que ceux obtenus en opérant directement sur les cendres.

VI. — Dosage du phosphore.

J'ai effectué le dosage du phosphore en opérant toujours sur la matière végétale à l'état sec, d'après la méthode établie par Gab. BERTRAND (22).

La technique opératoire est, dans sa première partie, celle utilisée pour doser le soufre : destruction de la matière par l'acide azotique fumant, évaporation à consistance pâteuse, saturation de l'acidité par le carbonate, addition de mélange nitro-alcalin, fusion au four électrique.

Quand la fusion alcaline est terminée, on traite la masse fondue par l'eau bouillante jusqu'à désagrégation complète. On filtre la solution obtenue dans un matras, on lave le précipité d'abord à l'eau, ensuite avec 5 cm³ d'acide acétique au 1/10 pour dissoudre les sels alcalino-terreux, en recueillant leur solution et l'eau de lavage dans le même matras. Le filtre et son contenu sont séchés et brûlés dans un creuset de nickel où l'on ajoute ensuite 3 gr. de mélange nitro-alcalin. On chauffe le creuset au four électrique jusqu'à fusion complète de son contenu. Après refroidissement, on traite la masse fondue par l'eau comme précédemment et on recueille la solution toujours dans le même matras.

L'alcalinité de la liqueur est neutralisée par une solution d'acide chlorhydrique concentré dont on ajoute un léger excès (3 cm³ environ) et on ajoute encore 2 gr. de chlorure d'ammonium pur. Le tout est évaporé à siccité dans une capsule de porcelaine. Finalement on reprend par l'eau, on

ajoute 5 cm³ d'une solution acide d'acétate de sodium et on titre l'acide phosphorique à l'urane.

De même que pour le dosage du soufre, il y a des pertes importantes en phosphore si on effectue le dosage sur la partie minérale obtenue par l'incinération des plantes. Cependant cette perte est moins grande que celle que l'on observe pour le soufre ; elle atteint des valeurs comprises entre 0,2 et 7,1 % du phosphore contenu dans la matière végétale (22).

VII. — Dosage des métaux alcalins.

a) DOSAGE DU SODIUM.

Pour doser le sodium j'ai utilisé la formation du sel de STRENG, ou acétate triple d'uranyle, de magnésium et de sodium, d'après la technique de BLANCHETIÈRE, adaptée au cas des cendres végétales par Gab. BERTRAND ; elle a été utilisée par D. J. PERIETZEANU pour doser le sodium dans les végétaux (19).

Voici comment on opère :

On prépare d'abord les solutions acides d'acétate d'uranyle et d'acétate de magnésium. On garde une partie de la solution acide d'acétate d'uranyle, qui servira plus tard, et le reste est mélangé à un volume égal de la solution acide d'acétate de magnésium.

Ce mélange est fait au moins quelques heures avant le dosage car il se dépose toujours une certaine quantité d'acétate triple provenant, d'une part, du sodium qui se trouve dans ses composants et d'autre part, du sodium qui se dissout du flacon de verre dans lequel le mélange est conservé.

Une fois le réactif préparé on incinère 5 à 10 gr. de plante sèche dans une capsule de platine ou de quartz et par l'eau chaude on extrait des cendres les sels solubles. La solution aqueuse des cendres est divisée en deux parties ; une partie

servira au dosage du sodium et l'autre partie servira pour doser le potassium.

Il faut éviter l'emploi des capsules en porcelaine qui peuvent céder de petites quantités d'alcali.

Pour obtenir un bon dosage de sodium il faut éliminer dès le début le phosphore qui gêne le dosage. Pour cela on réduit par évaporation au volume de quelques centimètres cubes seulement, la solution où l'on veut doser le sodium. On transvase dans le tube d'une centrifugeuse, on ajoute 5 cm³ de solution d'acétate d'uranyle qui précipite l'acide phosphorique à l'état de phosphate d'uranyle et l'on centrifuge. Si le précipité de phosphate d'uranyle est important et s'il n'y a plus d'urane dans le liquide surnageant après la centrifugation, on répète une deuxième fois cette opération.

On décante le liquide centrifugé dans une capsule de silice fondue, d'une capacité de 200 cm³ environ ; on délaie le précipité de phosphate d'uranyle dans quelques centimètres cubes d'eau distillée, on centrifuge et le liquide surnageant est joint à la liqueur principale.

On ajoute alors à la solution sodique, un excès de réactif uranyl-magnésien, en remuant dans la capsule avec un agitateur en silice. Le sel triple apparaît presque aussitôt. On laisse déposer. On recueille le précipité d'acétate triple après trois à quatre heures, par décantation, en se servant d'un creuset d'Iena taré. Quand la décantation est terminée, on lave le précipité à trois reprises en utilisant chaque fois une dizaine de centimètres cubes de réactif pur et finalement on entraîne le précipité dans le creuset avec 20 à 30 cm³ d'alcool à 96°:

Le creuset est mis à l'étuve à 110° jusqu'à poids constant. Le poids trouvé multiplié par 0,0165 donne le poids du sodium contenu dans le précipité.

b) DOSAGE DU POTASSIUM.

Pour doser le potassium j'ai adopté la méthode au perchlorate, de SÉRULAS, selon la technique établie

par SCHLOESING et améliorée par Gab. BERTRAND (19).

Le dosage est effectué sur une partie aliquote de la solution aqueuse des cendres. On acidule cette liqueur par l'acide chlorhydrique en présence d'hélianthine, dans un petit gobelet en verre, et on précipite à l'ébullition l'acide sulfurique des sulfates par le chlorure de baryum employé en très léger excès. On laisse déposer, ensuite on filtre et on lave bien à l'eau bouillante le précipité de sulfate de baryum. La solution filtrée réunie aux eaux de lavage, placée dans une capsule de quartz, est réduite par évaporation au volume d'une vingtaine de centimètres cubes. On ajoute alors 2 cm³ d'acide perchlorique concentré et on continue l'évaporation jusqu'à ce qu'on obtienne un résidu presque sec. On ajoute une quinzaine de centimètres cubes d'eau distillée, puis 1 cm³ d'acide perchlorique et on évapore une seconde fois, d'abord au bain-marie, et lorsque le résidu est devenu sirupeux, au bain de sable jusqu'à production de fumées blanches. Celles-ci, dues à de l'acide perchlorique, témoignent du départ complet de l'acide chlorhydrique.

Le précipité est délayé dans 20 cm³ d'un mélange d'alcool et d'acide perchlorique. On laisse déposer et on décante le liquide surnageant dans un creuset d'Iena taré.

On lave ainsi le précipité, à deux ou trois reprises par délayage avec quelques centimètres cubes d'alcool perchlorique chaque fois.

Pour débarrasser le perchlorate de potassium des sels qu'il peut contenir, on le recristallise. Pour cela on chauffe la capsule au bain-marie pour chasser l'alcool, puis on dissout les cristaux dans un peu d'eau chaude, on ajoute quelques gouttes d'acide perchlorique et on évapore jusqu'à formation de fumées blanches, ainsi qu'il a été expliqué plus haut. Après refroidissement, on entraîne le précipité dans le creuset par le mélange alcool-acide perchlorique. Finalement on déplace l'alcool-acide par 2 à 3 cm³ d'alcool pur à 96°. Le creuset est maintenu dans une étuve à 125°-130° jusqu'à poids constant.

Le poids du perchlorate de potassium multiplié par 0,2822 donne le poids du potassium contenu dans le précipité.

* * *

Les métaux alcalins sont retrouvés par ces méthodes avec une approximation voisine du centième, plutôt meilleure avec le sodium qu'avec le potassium. Au cours de ce travail, j'ai effectué souvent le dosage des métaux alcalins dans la même solution des cendres ; les résultats ainsi obtenus se sont montrés d'une exactitude parfaite. Quand le résultat d'une analyse présentait un intérêt particulièrement intéressant, j'ai effectué un deuxième dosage en opérant sur une nouvelle prise d'essai du même échantillon. Il est à remarquer que cette fois encore les résultats sont très concordants, les petites différences observées en plus ou en moins trouvant leur explication dans l'inégalité de composition des matériaux soumis aux analyses et pouvant rentrer dans l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

Les résultats de ces expériences se trouvent dans les tableaux ci-joints.

Plante analysée	Poids de matière à l'état sec	ClO ₄ K pesé	Potassium trouvé	K % de matière sèche	Ecart entre 2 dosages	
	gr.	gr.	gr.	gr.	absolu	%
Avoine récoltée le 28.6.1932 .	3,005	0,2386	0,0673	2,2388	0,0252	1,12
do	2,602	0,2038	0,0576	2,2136		
Avoine récoltée 12.7.1932 ...	2,228	0,1588	0,0448	2,0108	0,0144	0,71
do	2,782	0,1996	0,0563	2,0252		
Colza récolté le 2.6.1932	2,436	0,2718	0,0767	3,1483	0,0279	0,87
do	2,100	0,2364	0,0667	3,1762		
Colza récolté le 16.6.1932 ...	3,259	0,3680	0,1038	3,1571	0,0511	1,59
do	2,032	0,2910	0,0652	3,2082		
Colza récolté le 2.7.1932	2,287	0,2024	0,0571	2,4962	0,0271	1,08
do	3,969	0,3473	0,0980	2,4691		

Plante analysée	Poids de matière à l'état sec gr.	Acétate triple pesé gr.	Sodium trouvé gr.	Na % de matière sèche gr.	Ecart entre 2 dosages	
					absolu	%
Avoine récoltée						
le 31.5.1932 .	2,668	0,8400	0,0139	0,5210	} 0,0043	0,81
do	3,198	1,0218	0,0168	0,5253		
Avoine récoltée						
le 12.7.1932 .	2,228	0,7676	0,0126	0,5655	} 0,0037	0,65
do	2,652	0,9160	0,0151	0,5692		
Avoine récoltée						
le 16.8.1932 .	4,672	0,6398	0,0105	0,2270	} 0,0029	1,27
do	3,123	0,4246	0,0070	0,2241		
Colza récolté le						
2.7.1932	2,287	0,4894	0,0081	0,3541	} 0,0017	0,47
do	3,969	0,8645	0,0142	0,3558		
Luzerne récoltée						
le 20.9.1932 .	4,425	0,5626	0,0093	0,2102	} 0,0009	0,43
do	2,747	0,3521	0,0058	0,2111		
Luzerne récoltée						
le 3.9.1933 ..	4,629	0,7404	0,0122	0,2635	} 0,0031	1,16
do	3,076	0,5010	0,0082	0,2666		

Le dosage de chaque métal alcalin a été effectué sur une partie aliquote de la solution aqueuse des cendres laissées par l'incinération de la prise d'essai. Cette partie aliquote représentait ainsi un poids déterminé de matière végétale sèche, poids qui se trouve inscrit dans la première colonne du tableau.

VIII. — Dosage des métaux alcalino-terreux.

a) DOSAGE DU CALCIUM.

Pour doser le calcium j'ai utilisé la méthode classique de précipitation par l'oxalate d'ammonium.

Voici la technique employée.

Les cendres obtenues par l'incinération de la prise d'essai traitées par l'acide chlorhydrique concentré en excès sont évaporées à siccité au bain-marie. On reprend le résidu sec par l'eau acidulée et on filtre pour séparer la silice qui est insolubilisée au cours de ce traitement. Le liquide filtré est neutralisé par l'ammoniaque ; les phosphates de fer, de

manganèse, d'aluminium ainsi que les phosphates alcalino-terreux se précipitent. On acidifie par l'acide acétique pour dissoudre les phosphates alcalino-terreux, on filtre, et dans la solution filtrée, portée à l'ébullition, on précipite le calcium par l'oxalate d'ammonium. Le précipité d'oxalate de calcium est lavé à l'eau bouillante jusqu'à ce que les eaux du lavage ne décolorent plus à chaud II à III gouttes d'une solution à 1/1000^e de $\text{Mn O}^4\text{K}$ en milieu sulfurique.

Le précipité recueilli est séché et ensuite calciné avec précaution dans une capsule de platine, à basse température. On obtient ainsi le carbonate de calcium que l'on pèse. Si la température a été un peu trop élevée, une partie du carbonate de calcium se transforme en chaux. Dans ce cas on mouille le contenu de la capsule avec une solution saturée de carbonate d'ammonium, on évapore à siccité au bain-marie et on finit de dessécher en chauffant légèrement au-dessus d'une petite flamme d'un bec Bunsen. L'anhydride carbonique libéré par la décomposition du carbonate d'ammonium se fixe sur la chaux qui se transforme en carbonate de calcium. On pèse. Avec un peu d'habitude on arrive facilement à obtenir en une seule opération tout le calcium à l'état de carbonate. J'ai souvent transformé le carbonate de calcium ainsi obtenu en sulfate, dans le but de vérifier la technique opératoire et j'ai constaté dans chaque cas une parfaite concordance entre les deux chiffres obtenus pour le calcium par ces deux moyens.

b) DOSAGE DU MAGNÉSIUM.

J'ai effectué le dosage du magnésium par précipitation à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien, en suivant la technique étudiée par E. CANALS (30) que j'ai modifiée dans certains points de détail.

Après avoir séparé le calcium ainsi qu'il est dit plus haut, on réunit le filtrat et les eaux de lavage du précipité d'oxalate de calcium, on acidifie par quelques gouttes d'acide chlorhydrique concentré et on évapore au bain-marie jusqu'au volume de 25 cm³ environ. On ajoute alors une solution de

chlorure d'ammonium à 1/10, puis de l'ammoniaque jusqu'à réaction franchement alcaline, enfin on précipite le phosphate ammoniaco-magnésien par quelques centimètres cubes d'une solution de $\text{PO}^4\text{Na}^2\text{H}$ à 1/15.

J'ai constaté qu'il était préférable d'opérer cette précipitation à chaud au lieu de la réaliser à froid comme le fait CANALS, afin de favoriser la formation des cristaux de phosphate ammoniaco-magnésien en cercueil, par une cristallisation lente. Après une attente de 12 heures, j'ai examiné au microscope I goutte de la liqueur portant en suspension quelques cristaux. Si leur forme est bien la forme caractéristique des cristaux de phosphate ammoniaco-magnésien, on filtre. Le précipité est lavé par décantation avec une solution d'ammoniaque à 2,5 % jusqu'à ce que l'eau de lavage additionnée d'acide nitrique ne précipite plus par le nitrate d'argent. Finalement on sèche le filtre, on détache le précipité et on brûle le papier dans une capsule de platine. Ordinairement la cendre du papier est de couleur grise et retient des traces de charbon. Pour compléter l'oxydation de la matière organique non brûlée, j'ai préféré ajouter au résidu une seule goutte d'acide nitrique au 1/10, d'évaporer l'eau avec précaution et de calciner le résidu sur la petite flamme d'une veilleuse. On ajoute ensuite la masse du précipité et on calcine d'abord à basse température, ensuite à une température élevée jusqu'à transformation complète du précipité en pyrophosphate de magnésium.

Si on veut purifier le phosphate ammoniaco-magnésien on centrifuge, on dissout le précipité dans un peu d'acide chlorhydrique et on le reprécipite une deuxième fois. On lave et on finit le dosage comme il est indiqué plus haut.

IX. — Dosage du fer.

Le fer a été dosé à l'état de bleu de Prusse d'après la méthode préconisée par MAQUENNE (60). Les phases principales de la méthode sont les suivantes :

Les cendres obtenues par incinération à base température sont d'abord traitées par l'acide nitrique concentré, pour achever l'oxydation de la matière organique non brûlée, ensuite elles sont transformées en cendres sulfatées à l'aide de l'acide sulfurique. On évapore jusqu'à fumées blanches, on reprend par III gouttes d'acide chlorhydrique et environ 2 cm³ d'eau, on centrifuge et on décante. Dans la solution obtenue on ajoute quelques gouttes d'une solution de phosphate de soude, un léger excès d'ammoniaque, pour précipiter les phosphates (Ca, Mg, Mn, Fe) et enfin 1 cm³ d'acide acétique qui dissout tout à l'exception du phosphate de fer que l'on rassemble par centrifugation. On dissout le précipité de phosphate ferrique dans III gouttes d'acide chlorhydrique et 2 à 3 cm³ d'eau et on verse la solution dans un petit tube contenant quelques gouttes de ferrocyanure de potassium fraîchement dissous. La coloration du bleu de Prusse apparaît immédiatement et il ne reste plus pour finir le dosage que de comparer sa coloration avec la coloration d'une solution renfermant sous le même volume une quantité connue de fer, préparée extemporainement.

La sensibilité de la réaction est très grande ; dans un volume de 3 cm³ une quantité de fer de 0 mgr. 0025 donne une belle coloration bleu.

Pour favoriser la formation du bleu de prusse à l'état de solution parfaitement limpide j'ai ajouté, au moment de sa formation, quelques gouttes d'une solution d'acide oxalique.

Pour effectuer ce dosage j'ai employé uniquement des réactifs exempts de trace de fer. A cet effet j'ai distillé au laboratoire tous les acides nécessaires ainsi que l'ammoniaque et par des analyses à blanc je me suis assuré de la pureté de tous les réactifs. J'ai également redistillé sous pression réduite l'eau distillée du laboratoire, dans un appareil construit entièrement en verre.

X. — Dosage du manganèse.

J'ai effectué le dosage du manganèse par la méthode colorimétrique, très précise, étudiée et mise au point par Gab. BERTRAND (17).

Le principe de cette méthode repose sur l'oxydation complète du manganèse à l'état de MnO_4K au moyen de persulfate de potassium, en milieu nitrique, et en présence de nitrate d'argent comme catalyseur de la réaction.

Ce dosage très délicat doit être effectué avec beaucoup de soins. Des traces de carbone et de chlore gênent et peuvent même arrêter le développement de la coloration du permanganate ; le nitrate d'argent d'une préparation trop ancienne peut mal fonctionner comme catalyseur. Pour effectuer un dosage complet et précis du manganèse il faut opérer de la manière suivante.

L'échantillon à l'état sec, placé dans une capsule de porcelaine, est incinéré dans un four à moufle chauffé à basse température. Il ne faut pas dépasser la température du rouge sombre. Pour aider la disparition du charbon, on tourne les cendres dans la capsule à l'aide d'un fil de platine. Quand toute la matière organique a disparu, on sature l'alcalinité de la cendre par l'acide chlorhydrique dont on ajoute un léger excès et on évapore à sec au bain-marie. Après refroidissement on ajoute un peu d'acide sulfurique pour décomposer les chlorures, on évapore à sec et ensuite on chauffe avec précaution au bord du four ou sur un bain de sable jusqu'à disparition des fumées blanches. Les cendres sont reprises par 3 à 4 cm³ d'acide nitrique 25 % et la solution obtenue est centrifugée pour la séparer du précipité de sulfate de calcium. Le liquide surnageant introduit dans un tube à essai jaugé à 10 cm³, est additionné de III à V gouttes d'une solution de nitrate d'argent à 10 % et de 2 à 3 dgr. de persulfate de potassium. On complète à 10 cm³ avec de l'acide nitrique et on porte à l'ébullition. Le manganèse est oxydé par l'oxygène qui se dégage et la coloration rose du permanganate de

potassium apparaît immédiatement. Il ne reste plus pour finir le dosage qu'à comparer la coloration obtenue avec la coloration d'une série de tubes identiques renfermant dans 10 cm³ une quantité connue de manganèse. On prépare cette gamme à l'aide d'une solution de sulfate de manganèse pur. On peut facilement distinguer dans ces conditions 0 mgr. 002 de manganèse dans 10 cm³ de solution.

XI. — Dosage du silicium.

Le silicium a été dosé à l'état de silice, rendue insoluble, en évaporant à sec les cendres mouillées d'acide chlorhydrique concentré. La méthode est classique, pourtant si on ne prend pas certaines précautions on risque de trouver des résultats inexacts. Voici la technique que j'ai utilisée.

L'échantillon à analyser est incinéré dans une capsule de platine et les cendres obtenues, additionnées d'un excès d'acide chlorhydrique concentré, sont évaporées à siccité au bain-marie. Le résidu, humecté de quelques gouttes d'acide chlorhydrique, est repris à l'eau bouillante. On filtre et on lave avec soin le précipité. Le filtrat additionné de l'eau de lavage est évaporé à sec ; le résidu mouillé de quelques gouttes d'acide chlorhydrique est repris à l'eau, filtré et lavé comme précédemment. On réunit les eaux de lavage au filtrat principal et on répète au besoin une deuxième fois cette dernière opération.

Les précipités recueillis sont rassemblés dans une capsule de platine, puis calcinés à haute température ; après refroidissement on effectue une première pesée.

Le précipité de silice est alors dissous dans un peu d'acide fluorhydrique, on y ajoute I ou II gouttes d'acide sulfurique et on évapore à sec au bain-marie. Finalement on chauffe le résidu au-dessus d'une flamme jusqu'à disparition complète des fumées blanches et on pèse à nouveau la capsule.

Le poids des impuretés que l'on a isolé par ce procédé est déduit du poids de la silice donnée par la première pesée.

La différence représente le poids de la silice qui s'est volatilisée à l'état de $\text{Si F}^6 \text{H}^2$.

On trouve dans la littérature scientifique de nombreuses déterminations de la silice dans les végétaux, mais la plupart sont effectuées sans les précautions nécessaires.

Pour obtenir un dosage exact de la silice totale il faut éviter l'emploi des capsules de porcelaine dont l'enduit silicieux est attaqué par les cendres alcalines, pendant l'incinération des végétaux. Il faut également évaporer à sec le filtrat et les eaux de lavage obtenues lors de la première filtration ; on insolubilise ainsi la silice qui échappe au cours de la première opération (environ 5 % de la silice totale).

Il est de même absolument indispensable que toute la silice ainsi obtenue soit traitée par l'acide fluorhydrique en présence d'acide sulfurique. Cette opération permet de connaître le poids des impuretés qui accompagnent toujours la silice et dont il faut tenir compte. En effet, il est pratiquement impossible de débarrasser la silice, par lavage à l'eau, de sels de magnésium et de calcium plus particulièrement, dont on la trouve chargée en fin d'analyse. Malgré les soins pris pour le lavage de la silice, j'ai constaté au cours de mes dosages, que l'erreur possible peut atteindre jusqu'à 3,7 % du poids de la silice. J'ai considéré le résidu obtenu après le traitement par $\text{HF} + \text{SO}^4 \text{H}^2$ comme étant constitué par du sulfate de calcium : son poids, calculé en Ca O , est déduit du poids de la silice soumise au traitement indiqué.

Voici les résultats des dosages de silicium dans l'avoine, plante très riche en silicium et par contre pauvre en calcium.

Avoine récoltée en 1932 le :	Prise d'essai à l'état sec	Avant traitement par HF		Après traitement par HF		Différence des deux pourcentages	
		Poid de la silice	Si % de matière sèche	Poids du résidu de Ca O	Si % de matière sèche	absolue	%
		gr.	gr.	gr.	gr.		
31 mai	4,194	0,0978	1,0944	0,0033	1,0562	0,0382	3,62
28 juin	4,926	0,1232	1,1733	0,0029	1,1449	0,0284	2,48
12 juillet ...	4,184	0,1160	1,3002	0,0028	1,2691	0,0311	2,45
5 août	3,806	0,1470	1,8102	0,0055	1,7446	0,0656	3,76
16 août ...	3,442	0,1603	2,1809	0,0047	2,1208	0,0601	2,83

Dans les analyses des plantes où le silicium n'entre que pour quelques milligrammes par kilo de matière et où par contre le calcium est très abondant (crucifères, légumineuses, etc.) le dosage de silicium sans les précautions décrites plus haut, est affecté d'une erreur beaucoup plus grande que celle signalée plus haut pour une graminée.

XII. — Détermination de l'oxygène.

J'ai déterminé la teneur en oxygène par différence, en totalisant les résultats de mes dosages portant sur douze des principaux éléments constitutifs de la matière végétale et en déduisant de 100 leur somme.

BOUSSINGAULT, MÜNTZ, MAQUENNE, BERTHELOT et ANDRÉ, ainsi que tous les auteurs qui ont cherché à déterminer le taux de l'oxygène dans les végétaux, totalisent les résultats obtenus pour le carbone, l'hydrogène, l'azote et les cendres et ils déduisent de 100 leur somme : le chiffre obtenu représente la teneur en oxygène.

Ce calcul repose sur une considération erronée : les cendres ne représentent jamais la totalité des éléments minéraux fixes dans les proportions mêmes où ils se trouvent dans la matière vivante. J'ai eu l'occasion de constater qu'un certain nombre d'éléments minéraux peuvent se volatiliser pendant l'incinération de la prise d'essai, tels le soufre, le phosphore et, si l'incinération n'est pas effectuée avec soin, le sodium, le potassium.

La perte de poids qu'éprouvent les cendres par suite du départ des éléments volatils, est loin d'être négligeable. Pour ne citer qu'un seul exemple, il suffit de rappeler ici que la perte en soufre peut atteindre dans ces conditions, pour certaines plantes, plus de 50 % du soufre contenu dans la matière vivante.

Mais admettons qu'il n'y ait aucune perte de substance minérale par volatilisation au cours de l'incinération de l'échantillon : le calcul de l'oxygène, reposant sur la considé-

ration que le poids des cendres représente le poids des éléments fixes entrant dans la composition chimique de la matière vivante reste toujours inexact.

Les éléments minéraux se trouvent dans les cendres à l'état de diverses combinaisons chimiques constituées avec le concours du carbone (carbonates) et de l'oxygène même (carbonates, oxydes, silicates). De la sorte, le poids réel des éléments minéraux contenus dans la matière végétale « évalué à l'état... de cendres » est trouvé par excès, augmenté du poids toujours incertain du carbone et de l'oxygène combinés aux éléments minéraux en proportions très variables d'une incinération à l'autre.

On voit donc à quelle erreur on s'expose en déterminant la teneur en oxygène au moyen de ce calcul.

Pour trouver la teneur rigoureusement exacte en oxygène à l'aide de la méthode par différence, il serait nécessaire de doser séparément tous les éléments qui entrent dans la composition de la matière vivante. Une détermination aussi complète n'a jamais été tentée.

Ainsi que je l'ai déjà dit plus haut, j'ai déterminé la teneur en oxygène pour les végétaux qui font l'objet de cette étude, en utilisant les résultats des dosages de douze éléments choisis parmi les principaux constituants de la matière vivante.

Seuls les éléments catalytiques (Cu, Ni, Co, Ti, V etc..) dont la proportion dans les végétaux atteint pour chacun d'eux des valeurs plus petites que 1/10 de milligramme pour 100 gr. de matière n'entrent pas dans mon calcul. Comme la proportion globale des éléments catalytiques est très faible, la teneur en oxygène ainsi obtenue est donc extrêmement voisine du taux réel.

XIII. — Contrôle et purification des réactifs.

Toutes les analyses effectuées au cours de ce travail ont été réalisées avec des précautions particulières quant à la pureté des réactifs nécessaires. Il arrive très souvent que le résultat

d'une analyse soit rendu inexact uniquement par l'emploi des réactifs impurs.

Afin d'éviter ces causes d'erreurs j'ai vérifié et purifié au laboratoire tous les réactifs dont je me suis servi. L'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide nitrique ordinaire, l'acide nitrique fumant et l'ammoniaque sont purifiés par distillation au laboratoire dans des appareils spéciaux. Avant d'utiliser le distillat ainsi obtenu j'ai effectué dans chaque cas un contrôle pour m'assurer qu'il ne renferme plus de traces de l'élément dont il doit être dépourvu.

Le carbonate de sodium, le nitrate de potassium ainsi que tous les autres réactifs analogues sont soumis au même contrôle. Enfin l'eau distillée du laboratoire est redistillée sous pression réduite dans un appareil entièrement en verre. J'ai également effectué avec les réactifs ainsi obtenus des analyses à blanc.

XIV. — Représentation des résultats.

Les résultats de mes recherches sont indiqués dans les tableaux suivants. Ils sont exprimés en général en grammes d'élément dosé par rapport :

- 1° à 100 gr. de matière à l'état frais ;
- 2° à 100 gr. de matière à l'état sec.
- 3° à 100 gr. de cendres totales.
- 4° à 100 plantes.

Pour certains éléments tels que le fer et le manganèse, dont la teneur ne s'élève qu'à quelques milligrammes pour 100 gr. de matière, j'ai exprimé leur teneur en milligrammes par kilogramme de matière à l'état frais et à l'état sec et en milligrammes pour 100 gr. de cendres.

Pour toutes les plantes, sauf l'avoine, le silicium est représenté de la même manière que le fer et le manganèse.

Chez le sarrasin le taux de sodium est exprimé également en milligrammes par kilogramme de matière,

Pour la clarté de la présentation et pour éviter toute confusion j'ai groupé les résultats concernant le silicium, le fer et le manganèse à la fin de chaque tableau. Pour le sodium dans le sarrasin une mention rappelle qu'il s'agit de milligrammes par kilogramme de matière.

On trouvera dans ces tableaux des chiffres qui expriment la teneur de 100 gr. de cendres en soufre et en phosphore bien que les dosages sont effectués directement sur la matière sèche et non pas sur les cendres ; j'ai calculé ces chiffres et je les ai inscrits sur les tableaux dans le but de rendre mes résultats comparables aux anciennes données analytiques, où le dosage de ces éléments a été pratiqué dans les cendres mêmes.

Pour représenter sous une forme plus concrète la relation entre l'assimilation du carbone et l'absorption par les plantes de tous les autres éléments considérés comme indispensables à leur vie, j'ai calculé la valeur du rapport Carbone/élément dosé.

Afin de trouver la relation qui existe entre l'élaboration des substances organiques quaternaires et l'absorption des éléments minéraux, j'ai calculé les rapports $\frac{C+H+O+N}{\text{élément dosé}}$.

Enfin j'ai déterminé également la valeur des rapports existant entre deux éléments, S/P, K/Na, Ca/Mg.

CHAPITRE II

I. — ÉTUDE DU COLZA.

J'ai commencé l'étude du colza en 1931 et l'ai continuée plus systématiquement durant l'année 1932.

Trois récoltes successives sont effectuées pendant l'année 1931 :

- 1^o le 18 juin : les plantes étaient en fleurs.
- 2^o le 21 juillet : les plantes portaient les siliques renfermant des graines peu développées.
- 3^o le 3 août : les siliques étaient toujours vertes mais les graines étaient complètement développées. Quelques branches portaient des fleurs nouvellement sorties (deuxième floraison).

La saison a été particulièrement favorable pour la végétation : les plantes se sont développées normalement et étaient très vigoureuses.

Les résultats des analyses sont inscrits pages 62 à 65.

* * *

Durant l'année 1932 j'ai analysé le colza dès le début de sa végétation.

L'ensemencement est pratiqué le 30 avril et les récoltes sont effectuées aux dates suivantes :

- 1^o le 2 juin : plante portant les cotylédons et les deux premières feuilles.

Hauteur des parties aériennes 13 cm. environ,

2° le 16 juin : plante au début de la floraison (apparition des premiers bourgeons floraux).

Hauteur des parties aériennes 25 cm. environ.

3° le 2 juillet : plante en pleine floraison.

Hauteur des parties aériennes 60 cm. environ.

4° le 20 juillet : plante portant des siliques vertes : les graines sont assez développées.

Hauteur des parties aériennes 75 cm. environ.

5° le 16 août : plante portant des siliques sèches ; les graines sont mûres.

Hauteur des parties aériennes 77 cm. environ.

Durant l'année 1932 la saison a été sèche et très chaude, pourtant le colza s'est très bien développé, mais il n'était pas aussi vigoureux en tige que durant la saison de l'année 1931. La deuxième floraison ne s'est pas produite cette année-ci.

Les résultats des analyses de ces cinq récoltes se trouvent rassemblés dans les tableaux suivants, pages 62 à 65.

ANALYSE DU COLZA

—

REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS

COLZA. — Composition chimique : Parties aériennes.

	Date des récoltes 1931			Date des récoltes 1932				
	18 juin	21 juillet	3 août	2 juin	16 juin	2 juillet	20 juillet	16 août
Teneur exprimée en grammes % de matière fraîche :								
Eau	87,85	82,76	80,63	92,07	91,14	86,96	83,75	79,56
Matière sèche	12,15	17,24	19,37	7,93	8,86	13,04	16,25	20,44
Cendres totales	2,33	2,25	2,45	1,62	1,57	1,95	1,96	2,61
Carbone	4,86	7,44	8,79	3,19	3,64	5,56	7,28	9,22
Azote	0,6147	0,6947	0,7050	0,5020	0,4761	0,5528	0,5700	0,7317
Soufre	0,1489	0,1878	0,2371	0,0928	0,1010	0,1441	0,1650	0,2530
Phosphore	0,0670	0,0878	0,0960	0,0532	0,0557	0,0598	0,0678	0,0875
Sodium	0,0496	0,0424	0,0460	0,0518	0,0470	0,0462	0,0425	0,0619
Potassium	0,3488	0,2669	0,2950	0,2520	0,2821	0,3256	0,2525	0,3226
Calcium	0,4945	0,5099	0,5020	0,3182	0,2491	0,3564	0,3901	0,5377
Magnésium	0,0516	0,0612	0,0592	0,0304	0,0340	0,0477	0,0488	0,0655

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière fraîche :

Fer	9,90	12,46	14,63	7,74	6,48	11,41	11,86	15,29
Manganèse	8,73	9,22	10,86	3,93	4,12	5,99	7,75	10,28
Silicium	20,74	63,51	76,94	14,75	11,54	16,40	66,10	93,05

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche :

Cendres totales	19,25	13,10	12,64	20,41	17,70	14,99	12,11	12,77
Cendres solubles	7,22	4,80	4,57	8,59	7,76	6,64	4,77	4,88
Cendres insolubles	12,03	8,30	8,07	11,82	9,94	8,35	7,34	7,89
Carbone	39,98	43,18	45,47	40,31	41,05	42,68	44,67	45,12
Hydrogène	5,02	5,37	6,03	5,05	5,36	5,44	5,79	5,90

Azote.....	5,06	4,03	3,64	6,33	5,38	4,24	3,51	3,58
Soufre	1,2251	1,0899	1,2240	1,1700	1,1403	1,1046	1,0147	1,2375
Phosphore	0,5567	0,5085	0,4942	0,6708	0,6287	0,4586	0,4171	0,4279
Sodium	0,4082	0,2462	0,2376	0,6524	0,5308	0,3541	0,2615	0,3030
Potassium.....	2,8710	1,5478	1,5221	3,1762	3,1571	2,4962	1,5542	1,5783
Calcium.....	4,0741	2,9575	2,5901	4,1128	2,8121	2,7328	2,4015	2,6304
Magnésium	0,4252	0,3552	0,3053	0,3834	0,3831	0,3658	0,3005	0,3203

Teneur exprimée en milli grammes par kilogramme de matière sèche :

Fer.....	81,49	72,27	75,53	97,57	73,19	87,44	72,97	74,82
Manganèse	71,85	53,48	56,06	49,62	46,54	45,92	47,71	50,26
Silicium.....	170,73	368,31	397,24	186,10	130,35	125,52	406,89	455,00

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche dépourvue d'éléments minéraux :

Carbone	44,22	46,30	48,59	44,88	44,94	46,16	47,52	48,28
Hydrogène	5,55	5,75	6,44	5,62	5,86	5,88	6,15	6,31
Oxygène	44,63	43,61	41,07	42,43	43,29	43,37	42,58	41,57
Azote.....	5,59	4,32	3,89	7,04	5,89	4,58	3,73	3,83

Teneur exprimée en grammes % de cendres totales :

Soufre	6,3639	8,3201	9,6835	5,7321	6,4410	7,3652	8,3812	9,6861
Phosphore	2,8930	3,8789	3,9098	3,2860	3,5531	3,0551	3,4432	3,3510
Sodium	2,1208	1,8823	1,8831	3,1757	2,9809	2,3615	2,1603	2,3711
Potassium.....	14,9151	11,8477	12,0413	15,4613	17,9896	16,6472	12,8400	12,3505
Calcium.....	21,1597	22,3081	20,4902	19,1218	16,0547	18,2696	20,1096	20,3975
Magnésium	2,2084	2,6798	2,4134	1,8279	2,1875	2,4455	2,5439	2,4881

Teneur exprimée en milli grammes % grammes de cendres totales :

Fer.....	42,97	55,16	59,75	47,84	42,54	57,50	61,84	58,04
Manganèse	37,32	40,42	44,35	23,51	26,47	31,50	39,76	40,23
Silicium.....	88,67	281,14	314,24	88,17	74,13	86,09	321,40	364,10

COLZA. — Composition de 100 plantes (parties aériennes).

Date des récoltes 1931

	18 juin	21 juillet	3 août	2 juin	16 juin	2 juillet	20 juillet	16 août
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Matière fraîche.....	845,40	1886,00	2074,00	77,00	286,00	633,50	1268,00	1086,00
Matière sèche	102,71	325,17	399,00	6,11	25,34	82,61	206,00	222,00
Eau	742,69	1560,83	1675,80	70,89	260,66	550,89	1062,00	864,00
Cendres totales	19,772	42,593	50,434	1,2462	4,485	12,383	24,946	28,349
Cendres solubles	7,411	15,602	18,231	0,5245	1,9644	5,485	9,826	10,833
Cendres insolubles	12,361	26,991	32,193	0,7217	2,519	6,898	15,120	17,516
Carbone	41,06	140,41	181,42	2,461	10,402	35,259	92,020	100,166
Hydrogène	5,15	17,46	24,06	0,308	1,358	4,494	11,927	13,098
Oxygène	41,440	132,246	153,375	2,327	10,019	33,127	82,462	86,247
Azote.....	5,197	13,104	14,523	0,386	1,363	3,503	7,230	7,947
Soufre	1,2581	3,5440	4,8837	0,0715	0,2889	0,9125	2,0902	2,7472
Phosphore	0,5717	1,6534	1,9718	0,0409	0,1593	0,3788	0,8592	0,9499
Sodium	0,4192	0,8005	0,9480	0,0399	0,1344	0,2925	0,5387	0,6726
Potassium.....	2,9485	5,0329	6,0731	0,1923	0,8068	2,0622	3,2016	3,4638
Calcium	4,1841	9,6169	10,3344	0,2450	0,7124	2,2576	4,9470	5,8394
Magnésium	0,4366	1,1550	1,2181	0,0234	0,0972	0,3022	0,6190	0,7113

Teneur exprimée en milligrammes :

Fer.....	8,37	23,41	29,92	0,59	1,85	7,22	15,03	16,61
Manganèse	7,37	17,23	22,34	0,30	1,18	3,79	9,83	11,16
Silicium.....	17,53	120,31	155,62	1,14	3,30	10,37	83,80	101,01

COLZA. — Les rapports.

Carbone :								
Cendres totales	2,07	3,29	3,59	1,97	2,32	2,84	3,69	3,53
Cendres solubles	5,54	9,00	9,95	4,69	5,29	6,43	9,37	9,24
Cendres insolubles	3,32	5,20	5,63	3,41	4,13	5,11	6,08	5,72

Hydrogène	7,97	8,04	7,54	7,98	7,65	7,85	7,71	7,54
Oxygène	0,99	1,06	1,18	1,05	1,03	1,06	1,11	1,16
Azote.....	7,90	10,71	12,49	6,37	7,63	10,06	12,72	12,60
Soufre	32,63	39,62	37,15	34,42	36,00	38,64	44,02	36,13
Phosphore	71,82	84,94	92,01	60,18	65,29	93,08	107,10	105,44
Sodium	97,94	175,51	191,37	61,53	77,39	120,54	170,81	148,92
Potassium.....	13,92	27,89	29,87	12,79	12,89	17,09	28,74	28,92
Calcium.....	9,81	14,60	17,55	10,04	14,46	15,61	18,60	17,15
Magnésium	94,04	121,56	148,94	105,18	107,01	116,67	148,56	140,82
Fer.....	4905,61	5997,88	6063,50	4171,18	5622,70	4883,51	6122,42	6030,46
Manganèse	5571,23	8149,15	8120,86	8203,33	8815,25	9303,16	9361,14	8975,44
Silicium.....	2346,28	1170,08	1165,93	2158,77	3152,16	3400,09	1098,09	991,64

C+H+O+N :

Cendres totales	4,66	7,12	7,40	4,39	5,16	6,16	7,76	7,32
Cendres solubles	12,53	19,43	20,48	10,46	11,77	13,92	19,70	19,15
Cendres insolubles	7,48	11,23	11,59	7,59	9,18	11,07	12,80	11,84
Soufre	73,80	85,55	76,43	77,21	80,07	83,75	92,65	75,52
Phosphore	162,32	183,43	189,34	133,70	145,54	201,53	225,42	218,37
Sodium	221,59	379,02	393,85	137,05	172,70	261,58	359,25	308,25
Potassium.....	31,49	60,24	61,48	28,55	28,67	37,01	60,47	59,89
Calcium.....	22,19	31,53	36,09	22,37	32,50	33,84	39,14	35,53
Magnésium	212,95	262,52	306,55	238,34	238,57	252,92	312,82	291,78
Fer.....	11092,83	12958,12	12487,55	9291,52	12509,18	10579,36	12883,49	12489,94
Manganèse	12597,96	17598,37	16713,42	18273,33	19611,86	20153,82	19698,77	18589,42
Silicium.....	5305,54	2526,83	2408,89	4808,77	7012,72	7365,76	2310,72	2053,83
Soufre : Phosphore	2,20	2,14	2,47	1,74	1,81	2,40	2,43	2,89
Potassium : Sodium	7,03	6,28	6,40	4,86	6,03	7,05	5,94	5,21
Calcium : Magnésium	9,58	8,32	8,48	10,46	7,34	7,47	7,90	8,20

V. N. Ghitescu

Evolution de la composition chimique du colza au cours de son développement.

J'ai étudié la composition chimique du colza sur trois récoltes effectuées en 1931 et sur cinq autres récoltes effectuées en 1932.

Cette étude donne lieu à plusieurs observations :

La matière végétale considérée à l'état frais s'enrichit en substances minérales à mesure qu'elle approche de la maturité. Ce fait s'explique par la déshydratation progressive de la matière vivante au cours de son développement.

Composition de la matière sèche.

Par rapport à la matière sèche les proportions des cendres, tant solubles qu'insolubles, diminuent à mesure que la plante vieillit. Cette diminution est plus prononcée pour les cendres solubles que pour les cendres insolubles, ainsi que le font ressortir les chiffres du tableau suivant où la teneur maxima est fixée arbitrairement à 100.

RÉCOLTES EFFECTUÉES EN 1931.

	18 juin	21 juillet	3 août
Cendres solubles.....	100	66,48	63,30
Cendres insolubles	100	69,00	67,09

RÉCOLTES EFFECTUÉES EN 1932.

	2 juin	16 juin	2 juillet	20 juillet	16 août
Cendres solubles .	100	90,33	77,29	55,53	56,81
Cendres insolubles	100	84,09	70,64	62,10	66,75

Dans la composition des cendres, les sels solubles et les sels insolubles dans l'eau, entrent en proportions très variables d'une époque à l'autre :

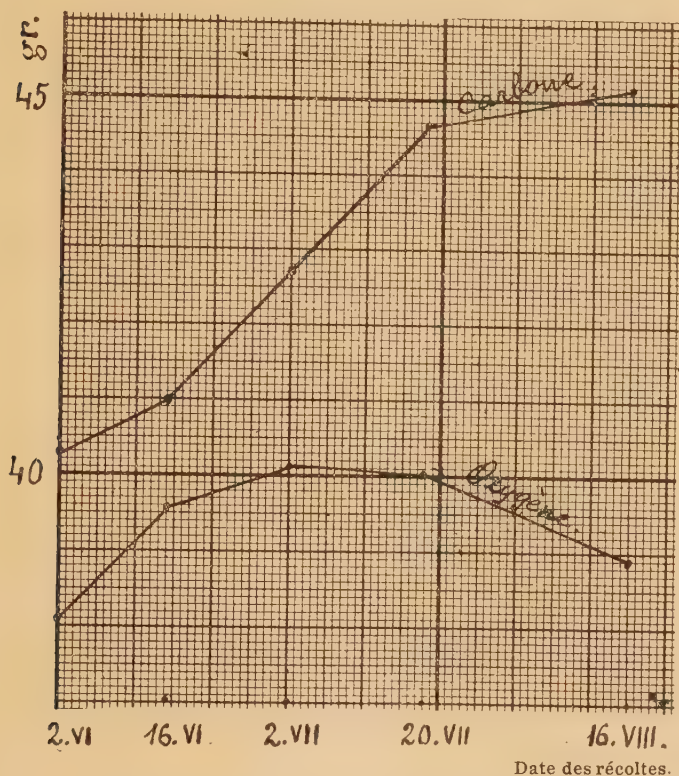
RÉCOLTES EFFECTUÉES EN 1931.

	18 juin	21 juillet	3 août
Sels solubles % de cendres totales	37,51	36,64	36,15
Sels insolubles % de cendres totales ...	62,49	63,36	63,85

RÉCOLTES EFFECTUÉES EN 1932.

	2 juin	16 juin	2 juillet	20 juillet	16 août
Sels solubles % de cendres totales	42,08	43,84	44,27	39,38	38,21
Sels insol. % de cendres totales ..	57,92	56,16	55,73	60,62	61,79

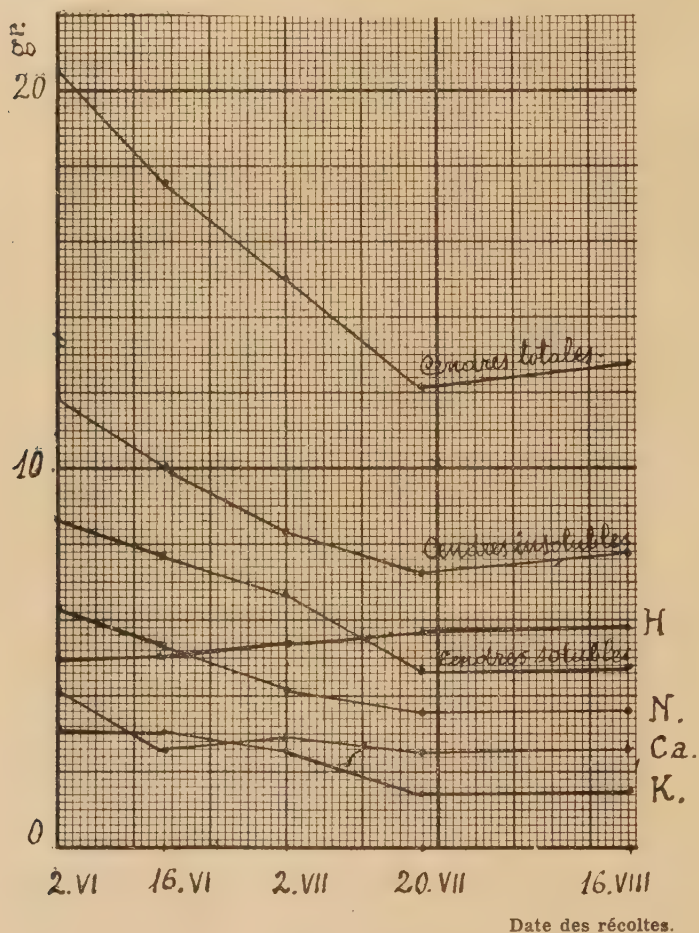
Jusqu'à l'époque de la floraison les cendres s'enrichissent progressivement en sels solubles ; à partir de cette époque, les



GRAPHIQUE n° 1. — Pour 100 grammes de matière sèche.

sels solubles diminuent et ce sont les sels insolubles qui augmentent. Toutefois la proportion centésimale des sels insolubles est toujours supérieure à la proportion des sels solubles. Ainsi s'explique pourquoi la proportion du calcium par exem-

ple diminue si elle est considérée par rapport à la matière sèche, tandis que, rapportée aux cendres, la teneur en calcium augmente avec l'âge.

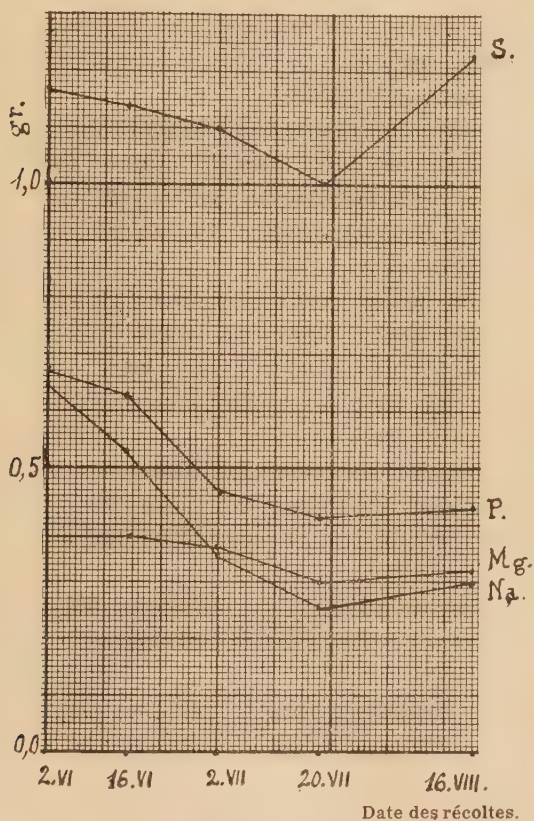


GRAPHIQUE n° 2. — Pour 100 grammes de matière sèche.

La teneur en carbone et la teneur en hydrogène augmentent avec l'âge. L'augmentation en carbone est petite au début, devient très sensible après la floraison et atteint la valeur maxima à la maturité complète.

La teneur en oxygène augmente légèrement jusqu'après la floraison et baisse tout de suite après (graphique n° 1).

Calculé par rapport à la « matière sèche dépourvue d'éléments minéraux » la proportion de carbone augmente avec



GRAPHIQUE n° 3. — Pour 100 grammes de matière sèche.

l'âge, surtout pendant la floraison et la fructification ; par contre la proportion d'oxygène subit une forte régression. Donc, au moment de la fructification, la matière organique du colza s'enrichit en carbone, en même temps que dans les graines s'accumulent des quantités importantes de matières grasses, principes très riches en carbone. Cette constatation

permet de supposer qu'il existe une certaine corrélation entre ces deux phénomènes.

L'azote, le soufre, le phosphore, le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium qui se trouvent en proportion maxima par rapport à la matière sèche, dès le début de la croissance des plantes, diminuent pendant les périodes qui suivent et enfin présentent une légère augmentation à l'époque finale de maturité des plantes.

On remarque que le soufre, le phosphore ainsi que le potassium gardent, à peu de chose près, la même valeur pendant les deux premières périodes et que c'est à partir de l'époque de la floraison que les proportions de ces éléments diminuent (graphique n° 2 et n° 3).

La proportion de fer est très grande au début de la croissance des plantes (valeur maxima) ainsi qu'à l'époque de la floraison : après avoir baissé pendant les autres périodes, la proportion de fer augmente légèrement à l'époque où la plante porte les graines.

Le manganèse atteint son maximum au moment de la maturité complète. Ce maximum n'est que très faiblement supérieur à la proportion de ce métal dans la plante toute jeune.

La proportion de silicium est faible au début de la croissance et devient assez forte dès le commencement de la maturité.

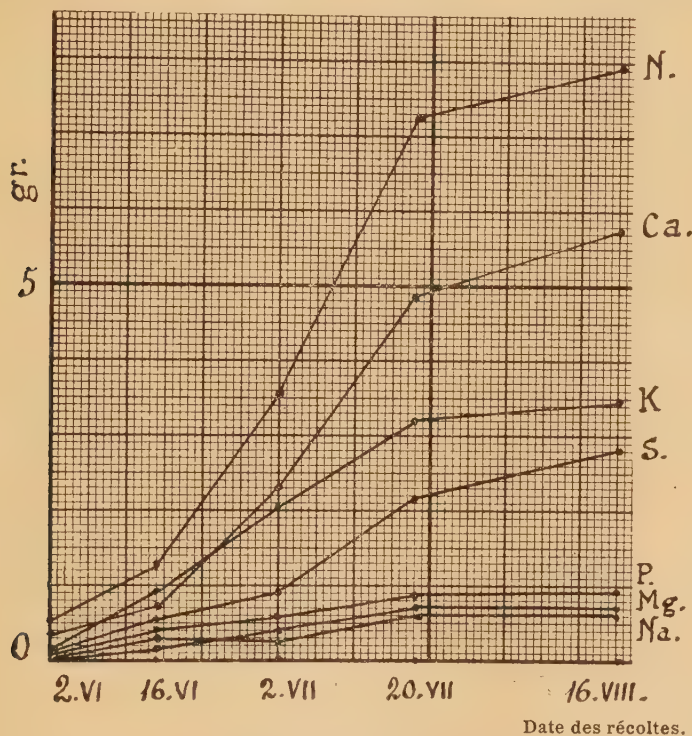
En résumé, la proportion de presque tous les éléments minéraux, considérés par rapport à la matière sèche, accusent une diminution à mesure que la végétation avance.

Composition des cendres.

Observées par rapport aux cendres, les proportions de soufre, de calcium, de manganèse et de silicium augmentent avec l'âge. Le magnésium augmente aussi avec l'âge et atteint la valeur maxima au commencement de la fructification ; cette valeur se maintient à peu de chose près jusqu'à la fin de la maturité. On trouve la plus forte proportion de phos-

phore au début de la floraison ; on constate ensuite une diminution pendant la floraison même, suivie d'une augmentation pendant la formation des graines.

La proportion de potassium commence par croître, atteint la valeur maxima au début de la floraison et diminue ensuite.

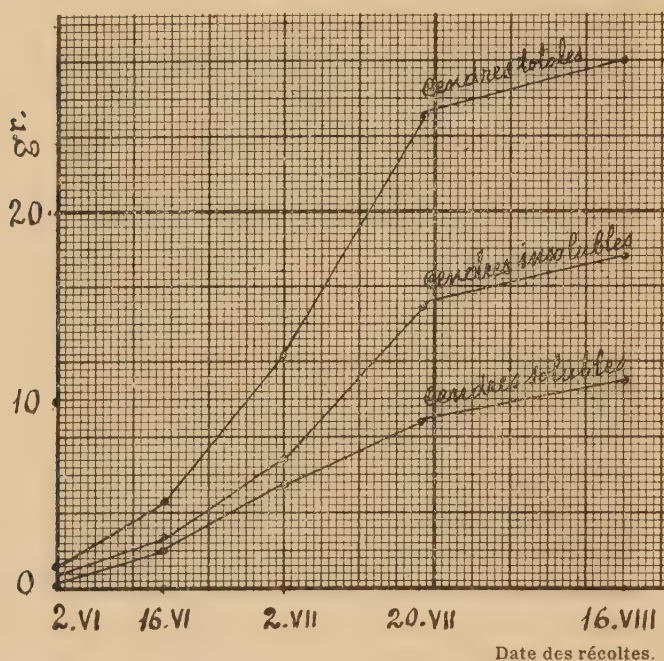


GRAPHIQUE n° 4. — Pour 100 plantes.

Le fer ainsi que le manganèse atteignent leurs proportions les plus fortes dès le commencement de la fructification et les gardent, sans grand changement, durant la maturation.

En résumé, des résultats analytiques exprimés par rapport à la matière sèche, on constate que la matière vivante contient, dès le premier stade de développement, des quantités très importantes de toutes les substances minérales qui la composent, mais ces substances diminuent d'une façon

régulière à mesure que la plante vieillit. D'après ces résultats on pourra donc conclure que l'absorption des substances minérales se ralentit beaucoup à partir d'une époque relativement très précoce de développement, ou bien qu'un processus d'élimination vient s'installer à côté de l'absorption.



GRAPHIQUE n° 5. — Pour 100 plantes.

La matière sèche semble s'appauvrir en substances minérales par suite de l'assimilation du carbone et de l'élaboration des substances organiques qui s'effectuent avec une rapidité qui dépasse celle de l'absorption des matières minérales.

D'autre part l'analyse de 100 plantes nous montre que ni les proportions de cendres, ni les proportions de chaque élément minéral pris à part, n'ont diminué à aucun moment durant toute la vie de la plante (voir tableau page 64 et graphique n° 4 et 5). Par conséquent l'élimination, si toutefois

elle a lieu, est toujours inférieure à l'absorption et cela pour chacun des éléments considérés.

Rangés d'après la grandeur décroissante de leur teneur, les éléments minéraux entrant dans la composition du colza s'inscrivent dans l'ordre suivant :

1^o Carbone, 2^o oxygène, 3^o hydrogène, 4^o azote, 5^o calcium, 6^o potassium, 7^o soufre, 8^o phosphore, 9^o magnésium, 10^o sodium, 11^o silicium, 12^o fer, 13^o manganèse.

On doit observer que la teneur du colza en soufre est de beaucoup supérieure à la teneur en phosphore. La valeur du rapport S/P est comprise entre 2,14 et 2,47 pour le colza récolté en 1931 et entre 1,74 et 2,89 pour les récoltes effectuées en 1932.

Ces résultats donnent une idée de l'importance du soufre dans la culture du colza ainsi qu'une première idée des proportions dont il faut composer un engrais destiné à subvenir aux besoins de cette culture.

Une certaine relation paraît exister entre la présence des substances minérales dans les végétaux et l'assimilation du carbone.

Les valeurs des rapports C/élément, augmentent régulièrement mais de peu d'une époque à l'autre. L'écart entre la plus petite et la plus grande valeur enregistrée durant toute l'évolution de la plante varie en général du simple au double, donc entre limites assez étroites.

Ces variations sont extrêmement petites notamment pour les rapports « C/H et C/O ».

Tandis que la valeur des rapports « carbone/éléments plastiques » atteint tout au plus des chiffres autour de 100, les valeurs des rapports « carbone/éléments catalytiques » dépassent toujours le chiffre 1000.

Il est très intéressant de remarquer que pour un stade de développement bien déterminé, la valeur de chaque rapport établi pour la même plante, cultivée sur le même terrain mais dans deux années successives, ne diffère que très peu d'une année à l'autre.

Cette constatation me permet de formuler l'hypothèse que

l'assimilation du carbone s'effectue en corrélation avec l'absorption de certaines substances minérales. Le rapport « carbone/élément considéré » diffère d'un stade de développement à l'autre mais sa valeur reste à peu près la même pour un stade bien déterminé.

Une relation toujours aussi étroite paraît exister également entre l'élaboration des substances quaternaires (C. H. O. N.) et la présence d'une certaine quantité de substances minérales (voir tableau page 65). En effet, si on compare les rapports « C + H + O + N/élément », établis pour les récoltes de colza effectuées en 1931, avec ceux établis en 1932, pour le colza arrivé aux mêmes stades de développement (les trois dernières colonnes) on observe que ces rapports ne diffèrent pas beaucoup entre eux, pour chaque élément considéré à part.

En résumé, on peut admettre, pour un certain nombre d'éléments, que la quantité de chacun d'eux présente dans la plante à un moment précis de son développement, est en relation étroite avec l'assimilation du carbone et l'élaboration des matières organiques.

II. — ÉTUDE DE L'AVOINE.

J'ai étudié la composition de l'avoine sur cinq récoltes. L'ensemencement a été pratiqué le 30 avril 1932 et les récoltes ont été effectuées aux dates suivantes :

1^o le 31 mai : plante portant les cotylédons et les deux premières feuilles.

Hauteur des parties aériennes 25 cm. environ.

2^o le 28 juin : plante au début de la floraison.

Hauteur des parties aériennes 50 cm. environ.

3^o le 12 juillet : plante en pleine floraison.

Hauteur des parties aériennes 73 cm. environ.

4^o le 5 août : plante portant les graines complètement développées.

Hauteur des parties aériennes 77 cm. environ.

5^o le 16 août : plante portant les graines mûres. Fin de maturation.

Dessiccation apparente des tiges et feuilles.

Hauteur des parties aériennes 78 cm. environ.

Les résultats des analyses se trouvent rassemblés dans les tableaux pages 76 à 78.

AVOINE. — Composition chimique : parties aériennes.

Date des récoltes 1932

	31 mai	28 juin	12 juillet	5 août	16 août
Teneur exprimée en grammes % de matière fraîche :					
Eau.....	89,93	87,82	82,92	66,13	60,38
Matière sèche	10,07	12,18	17,08	33,87	39,62
Cendres totales	1,61	1,57	1,98	2,97	4,19
Carbone	4,51	5,49	7,76	15,42	18,11
Azote	0,6253	0,5298	0,5194	0,8467	0,9627
Soufre.....	0,0821	0,0775	0,0963	0,1342	0,1566
Phosphore	0,0931	0,0762	0,0813	0,1104	0,1737
Sodium.....	0,0525	0,1090	0,0970	0,0966	0,0900
Potassium	0,3798	0,2727	0,3446	0,3309	0,3503
Calcium	0,0600	0,0891	0,1250	0,2214	0,3316
Magnésium	0,0394	0,0464	0,0569	0,0792	0,1025
Silicium	0,1063	0,1394	0,2167	0,5908	0,8402

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière fraîche :

Manganèse	2,40	1,48	0,82	3,20	3,45
Fer	10,81	7,14	8,55	22,09	42,85

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche :

Cendres totales	15,97	12,92	11,61	10,97	10,57
Cendres solubles ...	10,06	7,29	5,69	3,90	2,86
Cendres insolubles ..	5,91	5,63	5,92	7,07	7,71
Carbone	44,78	45,10	45,45	45,54	45,71
Hydrogène.....	5,38	5,45	5,48	5,56	5,74
Oxygène.....	35,60	38,49	40,15	41,16	40,94
Azote	6,211	4,348	3,005	2,503	2,434
Soufre.....	0,8144	0,6358	0,5701	0,4951	0,4969
Phosphore	0,9245	0,6251	0,4760	0,4072	0,4385
Sodium.....	0,5210	0,8948	0,5655	0,3565	0,2270
Potassium	3,7705	2,2388	2,0108	1,2215	0,8843
Calcium	0,5956	0,7314	0,7321	0,8167	0,8380
Magnésium	0,3913	0,3812	0,3333	0,2922	0,2591
Silicium	1,0562	1,1449	1,2691	1,7446	2,1208

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière sèche :

Fer.....	107,27	58,60	50,04	81,57	108,08
Manganèse	23,84	12,17	4,78	11,82	8,72

AVOINE. — Composition chimique : parties aériennes (suite).

	Date des récoltes 1932				
	31 mai	28 juin	12 juillet	5 août	16 août
<i>Teneur exprimée en grammes % de matière sèche, dépourvue d'éléments minéraux</i>					
Carbone	48,69	48,29	48,31	48,05	48,20
Hydrogène.....	5,84	5,83	5,82	5,86	6,05
Oxygène.....	38,70	41,21	42,67	43,43	43,17
Azote	6,75	4,65	3,19	2,64	2,56
Teneur exprimée en grammes % de cendres totales :					
Soufre.....	5,099	4,922	4,909	4,512	4,702
Phosphore	5,786	4,837	4,100	3,710	4,143
Sodium.....	3,2629	6,9330	4,8837	3,2500	2,1457
Potassium	23,6153	17,3453	17,3643	11,1333	8,3603
Calcium	3,8055	5,4336	6,2666	7,4130	7,6528
Magnésium	2,5000	2,8316	2,8533	2,6522	2,3678
Silicium	6,6136	8,8614	10,9311	15,9033	20,0643
<i>Teneur exprimée en milligrammes % grammes de cendres totales :</i>					
Fer	68,05	43,86	41,77	74,15	98,25
Manganèse	15,39	9,01	3,93	10,59	7,63

AVOINE. — Composition de 100 plantes (parties aériennes)

	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Matière fraîche.....	47,82	366,67	563,70	476,19	311,76
Matière sèche	4,82	44,67	96,29	161,31	123,53
Eau.....	43,00	322,00	467,41	314,88	188,23
Cendres totales	0,7697	5,7714	11,7999	17,6957	13,0571
Cendres solubles ...	0,4849	3,2564	5,4792	6,2911	3,5329
Cendres insolubles ..	0,2848	2,5150	5,7007	11,4046	9,5242
Carbone	2,157	20,146	43,766	73,460	56,465
Hydrogène.....	0,259	2,484	5,277	8,968	7,090
Oxygène.....	1,715	17,189	38,663	66,395	50,573
Azote	0,299	1,942	2,888	4,033	3,006
Soufre.....	0,0392	0,2840	0,5489	0,7970	0,6138
Phosphore	0,0445	0,2792	0,4583	0,6568	0,5416
Sodium.....	0,0251	0,3997	0,5542	0,5750	0,2804
Potassium	0,1816	1,0000	1,9502	1,9704	1,0924
Calcium	0,0287	0,3267	0,7049	1,3174	1,0352
Magnésium	0,0188	0,1702	0,3209	0,4713	0,3200
Silicium	0,0509	0,5114	1,2220	2,8142	2,6198
<i>Teneur exprimée en milligrammes :</i>					
Fer	0,52	2,61	4,82	13,14	13,35
Manganèse	0,11	0,54	0,46	1,93	1,07

AVOINE. — Les rapports.

	Date des récoltes 1932				
	31 mai	28 juin	12 juillet	5 août	16 août
Carbone :					
Cendres totales	2,80	3,49	3,91	4,15	4,32
Cendres solubles ...	4,45	6,18	7,98	11,67	15,98
Cendres insolubles ..	7,57	8,01	7,67	6,44	5,92
Hydrogène.....	8,32	8,27	8,29	8,19	7,96
Oxygène.....	1,25	1,17	1,13	1,10	1,11
Azote	7,21	10,37	15,15	18,21	18,78
Soufre.....	55,03	70,93	79,73	92,17	91,99
Phosphore	48,48	72,15	95,49	111,84	104,25
Sodium.....	85,95	50,40	78,97	127,75	201,37
Potassium	11,88	20,14	22,44	37,28	51,68
Calcium	75,17	61,66	62,08	55,76	54,54
Magnésium	114,76	118,36	136,34	155,86	176,45
Fer	4148,07	7718,77	9082,15	5590,56	4229,58
Manganèse	19609,09	37307,40	95165,21	38062,17	52771,02
Silicium	42,39	39,39	35,81	26,10	21,55
C+H+O+N :					
Cendres totales	5,76	7,23	8,10	8,63	8,97
Cendres solubles ...	9,13	12,81	16,53	24,29	33,15
Cendres insolubles ..	15,54	16,58	15,89	13,40	12,29
Soufre.....	113,59	146,87	165,01	191,79	190,77
Phosphore	100,68	149,50	197,80	232,65	216,11
Sodium.....	177,20	104,53	163,52	265,83	418,33
Potassium	24,34	41,71	46,45	77,59	107,26
Calcium	152,76	127,55	128,50	116,06	113,17
Magnésium	233,15	245,36	282,22	324,53	366,04
Fer	8519,23	15981,22	18795,43	11632,95	8774,08
Manganèse	40272,72	77242,59	196943,47	79200,51	109471,02
Silicium	87,07	81,57	74,13	54,31	44,70
Soufre : Phosphore .	0,88	1,01	1,19	1,21	1,13
Potassium : Sodium	7,24	2,50	3,55	3,43	3,89
Calcium : Magnésium	1,52	1,92	2,20	2,79	3,23

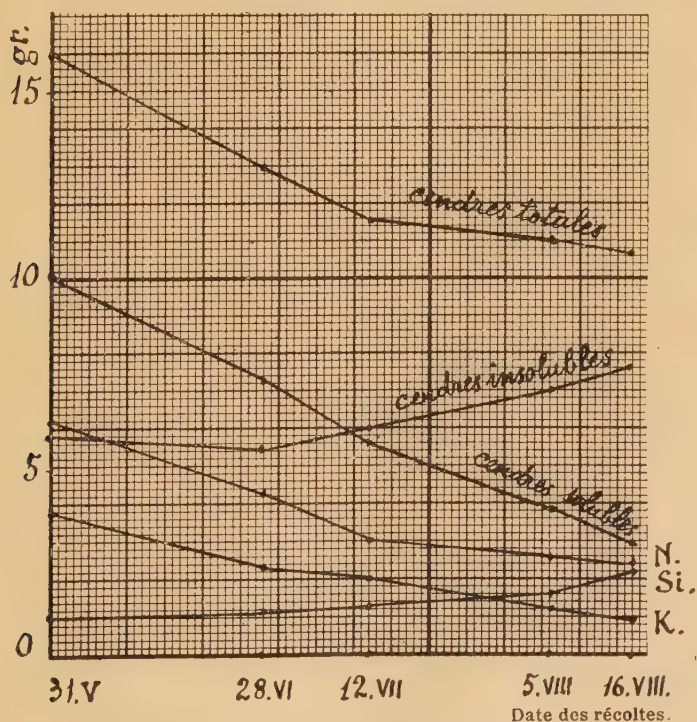
Evolution de la composition chimique de l'avoine au cours de son développement.

Les résultats analytiques assemblés dans les tableaux précédents donnent lieu aux observations suivantes :

Dans la matière végétale considérée à l'état frais, la proportion de cendres ainsi que la proportion de chaque élément considéré à part, augmente avec l'âge par suite de la déshydratation progressive de la matière vivante.

Composition de la matière sèche.

Par rapport à la matière sèche, les proportions de cendres totales et solubles diminuent à mesure que la végétation



GRAPHIQUE n° 6. — Pour 100 grammes de matière sèche.

avance ; par contre, la proportion de cendres insolubles augmenté avec l'âge (graphique n° 6).

Les proportions de cendres, tant solubles qu'insolubles, présentes à chaque époque, exprimées par rapport à la teneur maxima fixée arbitrairement à 100, sont :

	31 mai	28 juin	12 juillet	5 août	16 août
Cendres solubles	100	72,46	56,56	38,76	28,42
Cendres insolubles . . .	76,65	73,02	76,78	91,69	100

Seulement 28,42 % de cendres solubles se trouve à la fin de la maturation. La matière végétale sèche est donc à cette époque infiniment plus pauvre en sels solubles qu'elle était au début de la végétation.

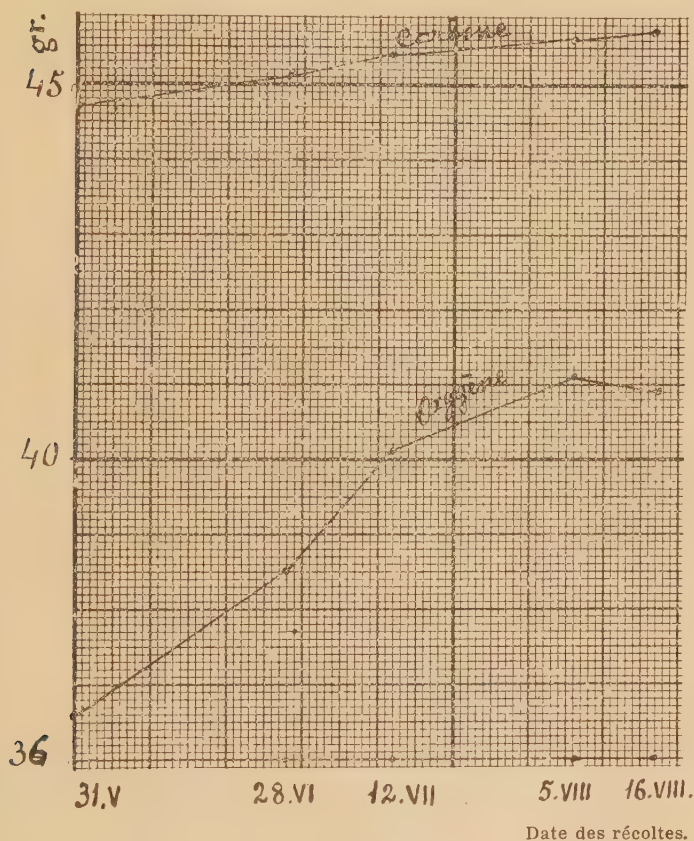
La teneur en carbone, la teneur en hydrogène et la teneur en oxygène augmentent avec l'âge ; toutefois, tandis que les proportions de carbone et les proportions d'hydrogène éprouvent de très petites variations durant le développement de la plante, la teneur en oxygène enregistre des augmentations très importantes (graphique n° 7). On peut attribuer cette abondante proportion d'oxygène, surtout à l'époque de la fructification, à l'élaboration de fortes quantités d'amidon.

Rapportées à la « matière sèche dépourvue d'éléments minéraux » les proportions de carbone et les proportions d'hydrogène gardent à peu près la même valeur pendant toute la végétation ; par contre la matière organique s'enrichit fortement en oxygène. Cet enrichissement ayant lieu en même temps que l'accumulation de l'amidon, principe très oxygéné, ce fait paraît bien confirmer l'hypothèse qu'il y a une relation entre ces deux phénomènes.

D'autre part, la matière organique utilise vers la maturation moins d'azote que dans le jeune âge.

L'azote, le soufre, le phosphore, le sodium, le potassium, le magnésium et le manganèse se trouvent, dans la matière sèche, en proportions maxima au début de la croissance ; ensuite et à mesure que la végétation avance, la teneur diminue d'une manière progressive pour chacun de ces éléments.

Toutefois le sodium atteint la valeur maxima peu avant la floraison, en même temps que le potassium baisse d'environ 40 % par rapport à la teneur maxima enregistrée au début de la végétation. Le soufre et le phosphore présentent



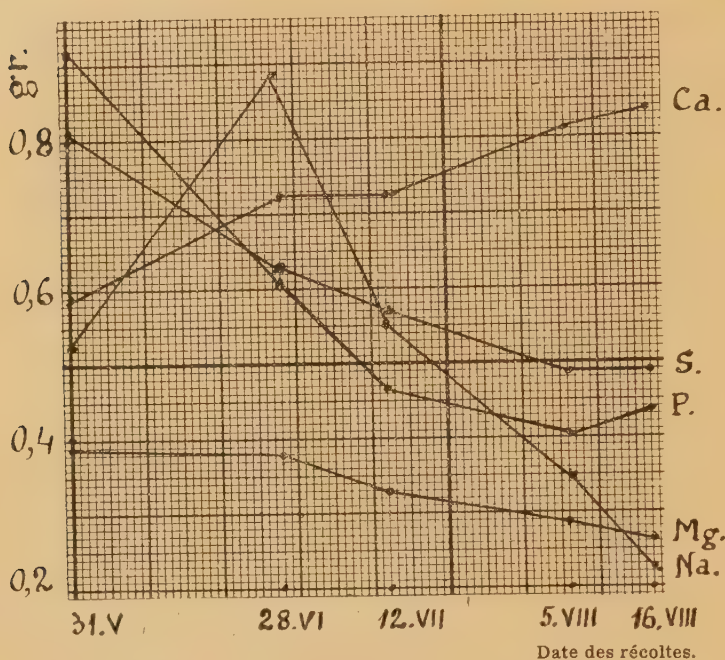
GRAPHIQUE n° 7. — Pour 100 grammes de matière sèche.

une légère tendance à augmenter à la fin de la maturation (graphique n° 8).

Les proportions de calcium et de silicium augmentent avec l'âge.

La teneur en fer est très grande dans la plante toute jeune

et à la fin de la maturation, quand le fer atteint la valeur maxima.



GRAPHIQUE n° 8. — Pour 100 grammes de matière sèche.

Composition des cendres.

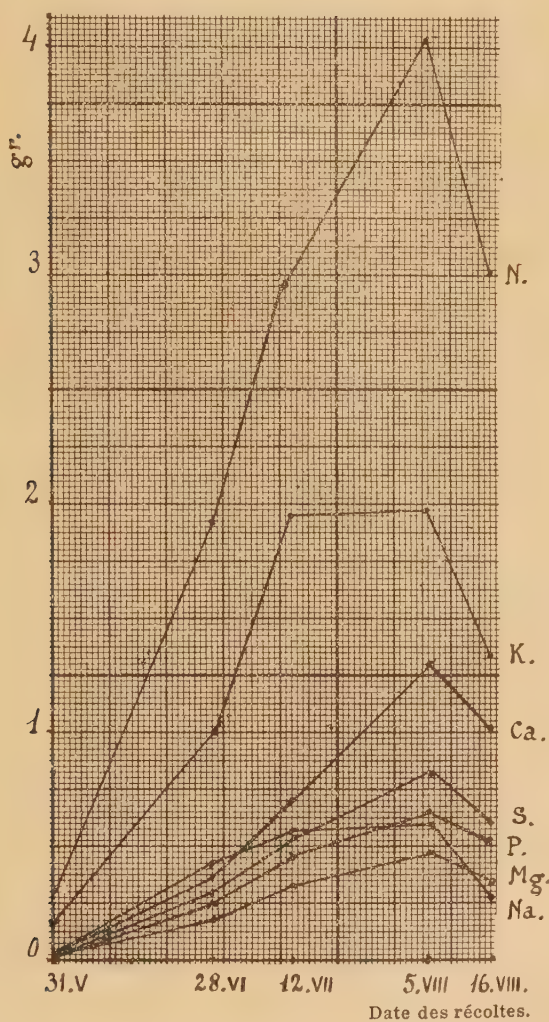
Par rapport aux cendres, les proportions de soufre et de phosphore sont maxima au début de la végétation, diminuent pendant les époques qui se succèdent et présentent une légère tendance à augmenter, à la maturité.

Le sodium augmente vite au commencement et atteint la proportion la plus élevée peu avant la floraison, ensuite, la teneur en sodium baisse continuellement.

La teneur en potassium, maxima au début de la floraison diminue ensuite d'une façon continue et rapide jusqu'à la fin de la végétation.

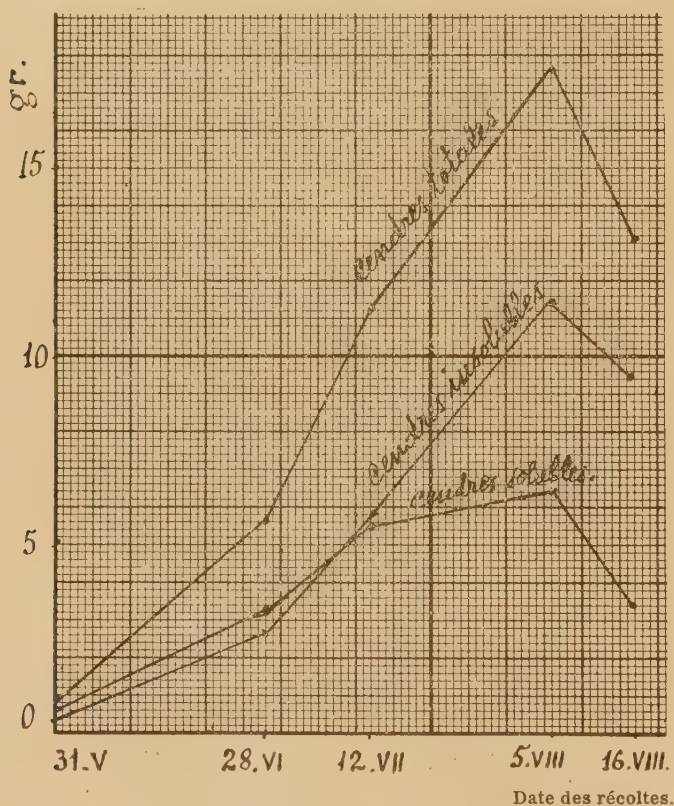
Le calcium et le silicium augmentent toujours avec l'âge.

La teneur en magnésium augmente jusqu'à l'époque de la floraison et diminue après.



Le fer et le manganèse diminuent à mesure que la végétation avance, cependant le fer augmente dès que les graines apparaissent.

Les résultats de l'analyse de 100 plantes (tableau page 77 et graphique nos 9 et 10) montrent que le poids de la matière vivante et la quantité de chaque élément entrant dans la composition de 100 plantes, augmentent avec l'âge jusqu'à l'époque de la maturation. A la fin de cette période, le poids



GRAPHIQUE n° 10. — Pour 100 plantes.

de la plante et tous les éléments, y compris le calcium et le silicium, éprouvent une diminution importante. Le fait que la diminution affecte tant la matière vivante qu'également des éléments comme le calcium et le silicium permet d'attribuer la baisse enregistrée à la maturité complète, au

phénomène d'élagage, la plante se trouvant à ce moment dans un état de dessiccation assez avancé.

Rangés d'après la grandeur décroissante de leur teneur, les éléments entrant dans la composition de l'avoine arrivée à l'époque de la floraison s'inscrivent dans l'ordre suivant :

1^o carbone, 2^o oxygène, 3^o hydrogène, 4^o azote, 5^o potassium, 6^o silicium, 7^o calcium, 8^o sodium, 9^o soufre, 10^o phosphore, 11^o magnésium, 12^o fer, 13^o manganèse.

La teneur en soufre est presque égale à la teneur en phosphore ; la valeur du rapport S/P varie pour l'avoine entre 0,88 et 1,21. Le rapport Ca/Mg. passe de 1,52 au début de la végétation à 3,23 à la maturité. Le potassium est 7 fois plus abondant que le sodium au début de la croissance de l'avoine et diminue dans la suite.

Les rapports C/H et C/O subissent des variations infimes durant toute la végétation de l'avoine. La majorité des rapports C/ élément ainsi que la majorité des rapports C + H + O + N/ élément atteignent à la maturité, des valeurs qui sont en général le double de leur valeur au début de la végétation. Pour le sodium et le potassium plus spécialement, les valeurs de ces rapports varient entre limites beaucoup plus larges.

III. — ÉTUDE DU SARRASIN

J'ai soumis à l'analyse cinq récoltes de sarrasin. L'ensemencement a été pratiqué le 30 avril 1932 et les récoltes ont été effectuées aux dates ci-indiquées :

1^o le 4 juin : plante portant les cotylédons et les premières feuilles.

Hauteur des parties aériennes 15 cm. environ.

2^o le 18 juin : plante peu avant la floraison.

Hauteur des parties aériennes 30 cm. environ.

3^o le 2 juillet : plante en fleurs.

Hauteur des parties aériennes 75 cm. environ.

4^o le 10 août : plante au début de la maturation.

Hauteur des parties aériennes 87 cm. environ.

5^o le 3 septembre : plante arrivée à la maturité, portant des graines mûres et quelques fleurs nouvellement sorties.

Hauteur des parties aériennes 92 cm. environ.

Les résultats des analyses se trouvent inscrits dans les tableaux pages 87 à 89.

SARRASIN. — Composition chimique : parties aériennes.

Dates des récoltes : 1932

4 juin 18 juin 2 juillet 10 août 3 septembre

Teneur exprimée en grammes % de matière fraîche :

Eau.....	92,09	92,74	89,86	81,40	79,87
Matière sèche	7,91	7,26	10,14	18,60	20,13
Cendres totales	1,87	1,64	1,77	2,41	2,45
Carbone	2,93	2,67	3,94	7,74	8,46
Azote	0,3781	0,3535	0,3995	0,5059	0,4034
Soufre.....	0,0306	0,0242	0,0303	0,0501	0,0555
Phosphore	0,1173	0,0743	0,1039	0,1625	0,2144
Potassium	0,1971	0,2401	0,2947	0,1814	0,1768
Calcium	0,3746	0,2593	0,3196	0,4000	0,442
Magnésium	0,1154	0,0895	0,1239	0,1682	0,1660

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière fraîche :

Sodium.....	11,40	5,24	10,74	7,90	9,45
Fer	9,38	6,63	10,29	15,02	26,24
Manganèse	2,02	1,12	1,46	2,83	4,56
Silicium	52,88	16,36	21,01	55,51	74,45

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche :

Cendres totales	23,67	22,07	17,49	12,97	12,18
Cendres solubles ...	5,13	7,05	5,94	2,45	2,15
Cendres insolubles ..	18,54	15,02	11,55	10,52	10,03
Carbone	37,06	36,81	38,90	41,61	42,04
Hydrogène.....	4,85	4,71	4,65	4,78	4,94
Oxygène.....	42,66	44,10	43,87	45,67	45,73
Azote	4,78	4,87	3,94	2,72	2,00
Soufre.....	0,3874	0,3332	0,2982	0,2693	0,2757
Phosphore	1,4837	1,0233	1,0243	0,8742	1,0649
Potassium	2,4865	3,3084	2,9065	0,9752	0,8787
Calcium	4,7420	3,5720	3,1499	2,1564	2,1955
Magnésium	1,4605	1,2349	1,2212	0,9041	0,8241

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière sèche :

Sodium.....	143,56	72,20	106,01	42,46	47,00
Fer	118,51	91,27	102,18	80,66	130,43
Manganèse	25,51	15,37	14,44	15,19	22,65
Silicium	668,36	225,31	207,17	298,43	369,69

SARRASIN. — Composition chimique : parties aériennes (suite).

	Dates des récoltes 1932				
	4 juin	18 juin	2 juillet	10 août	3 septembre
<i>Teneur exprimée en grammes % de matière sèche, dépourvue d'éléments minéraux :</i>					
Carbone	41,47	40,67	42,57	43,90	44,38
Hydrogène.....	5,42	5,20	5,09	5,04	5,21
Oxygène.....	47,74	48,73	48,02	48,18	48,28
Azote	5,35	5,38	4,31	2,87	2,11

Teneur exprimée en grammes % de cendres totales :					
Soufre.....	1,635	1,508	1,704	2,074	2,266
Phosphore	6,269	4,635	5,854	6,738	8,743
Potassium	10,5076	14,6800	16,6027	7,5264	7,2319
Calcium	19,1000	16,8750	17,1947	17,5622	18,1218
Magnésium	5,8823	5,8238	6,9851	7,3267	6,8020

<i>Teneur exprimée en milligrammes % grammes de cendres totales :</i>					
Sodium.....	60,50	32,00	60,50	32,80	38,65
Fer	47,59	41,48	55,83	62,83	106,90
Manganèse	10,28	6,91	7,99	11,68	18,71
Silicium	281,90	101,07	118,41	230,07	303,69

SARRASIN. — La composition de 100 plantes : parties aériennes.

	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Matière fraîche	89,16	482,76	2228,00	3720,00	3675,00
Matière sèche	7,05	35,05	226,00	692,00	740,00
Eau.....	82,11	447,70	2602,00	3028,00	2935,00
Cendres totales	1,6700	7,7372	39,5274	89,7524	90,1320
Cendres solubles ...	0,3619	2,4715	13,4244	16,9540	15,9100
Cendres insolubles ..	1,3081	5,2657	26,1030	72,7984	74,2220
Carbone	2,614	12,905	87,914	287,941	311,096
Hydrogène.....	0,342	1,651	10,509	33,077	36,566
Oxygène.....	3,009	15,460	99,146	316,041	338,400
Azote	0,337	1,707	8,904	18,822	14,800
Soufre.....	0,0273	0,1168	0,6739	1,8635	2,0401
Phosphore	0,1047	0,3587	2,3149	6,0494	7,8802
Potassium	0,1754	1,1598	6,5687	6,7491	6,5023
Calcium	0,3346	1,2522	7,1187	14,9222	16,2467
Magnésium	0,1030	0,4329	2,7599	6,2564	6,0983

**SARRASIN. — La composition de 100 plantes :
parties aériennes (suite).**

	Dates des récoltes 1932				
	4 juin	18 juin	2 juillet	10 août	3 septembre
<i>Teneur exprimée en milligrammes :</i>					
Sodium.....	1,01	2,53	23,95	29,75	34,80
Fer.....	0,84	3,20	23,05	55,77	96,20
Manganèse.....	0,18	0,54	3,25	10,52	16,72
Silicium.....	4,71	7,89	46,78	206,21	273,06

SARRASIN. — Les rapports.

Carbone :					
Cendres totales	1,56	1,66	2,22	3,21	3,45
Cendres solubles ...	7,22	5,22	6,54	16,98	19,55
Cendres insolubles ..	1,99	2,45	3,36	3,95	4,19
Hydrogène.....	7,64	7,81	8,36	8,70	8,51
Oxygène.....	0,87	0,83	0,88	0,91	0,92
Azote.....	7,76	7,56	9,87	15,29	21,02
Soufre.....	95,77	110,49	117,31	154,51	152,49
Phosphore.....	24,97	35,97	37,97	47,59	39,48
Sodium.....	2582,67	5098,97	3670,73	9678,68	8939,54
Potassium.....	14,91	11,12	13,38	42,66	47,84
Calcium.....	7,81	10,30	12,34	19,29	19,14
Magnésium.....	25,38	29,81	31,85	46,02	51,01
Fer.....	3113,09	4032,81	3822,34	5163,01	3233,84
Manganèse.....	14527,77	23898,14	27050,46	27370,81	18606,22
Silicium.....	555,20	1635,61	1879,30	1396,34	1139,54
C+H+O+N :					
Cendres totales	3,77	4,10	5,22	7,30	7,77
Cendres solubles ...	17,41	12,83	15,38	38,68	44,05
Cendres insolubles ..	4,81	6,02	7,91	9,00	9,44
Soufre.....	233,44	271,13	306,34	352,05	343,55
Phosphore.....	60,02	88,36	89,18	108,43	88,94
Sodium.....	6303,00	12689,20	8603,04	21862,66	20024,34
Potassium.....	36,01	27,34	31,43	97,18	107,79
Calcium.....	18,81	25,33	29,00	43,95	43,13
Magnésium.....	61,19	73,26	74,81	104,84	114,93
Fer.....	7503,57	9913,43	8957,61	11760,44	7285,36
Manganèse.....	35016,66	58746,29	63530,15	62346,00	41916,98
Silicium.....	1338,21	4020,65	4413,70	3180,79	2566,65
Soufre : Phosphore..	0,26	0,32	0,29	0,31	0,26
Potassium : Sodium.	173,68	458,75	274,42	229,46	187,11
Calcium : Magnésium	3,24	2,89	2,46	2,39	2,66

Evolution de la composition chimique du sarrasin au cours de son développement.

Les résultats analytiques groupés dans les tableaux précédents, donnent lieu aux observations suivantes :

Composition de la matière fraîche.

Considérée à l'état frais, la matière végétale est plus pauvre en cendres au début de la végétation qu'à la fin.

Presque tous les éléments (C, S, P, Na, Ca, Fe, Mn et Si). diminuent jusqu'à l'époque de la floraison, ensuite leurs proportions augmentent avec l'âge.

L'azote et le magnésium, assez abondants dans la plante toute jeune, se trouvent en moindres proportions au début de la floraison, augmentent ensuite pendant la maturation et diminuent de nouveau à la maturité. La teneur en potassium est maxima à l'époque de la floraison, après elle diminue.

Composition de la matière sèche.

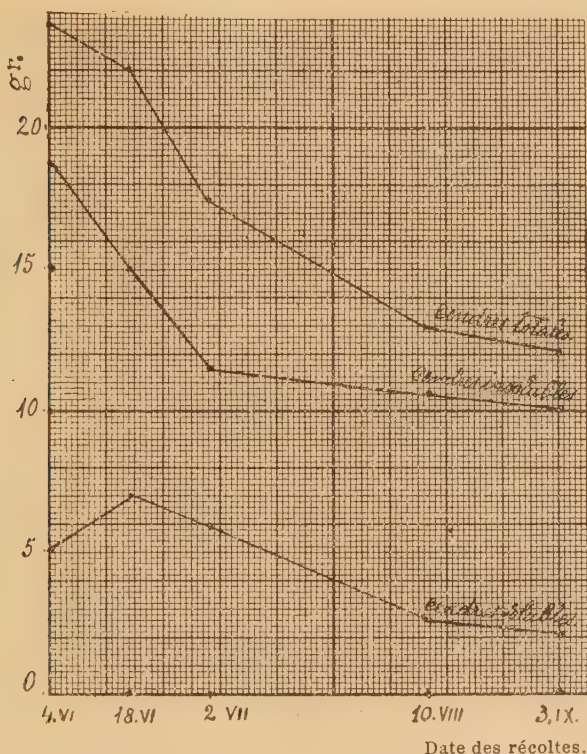
Par rapport à la matière sèche, les proportions de cendres totales et de cendres insolubles, diminuent à mesure que la plante vieillit. La proportion en cendres solubles augmente d'abord jusqu'au début de la floraison et diminue ensuite (graphique n° 11).

Les proportions de cendres, tant solubles qu'insolubles, exprimées par rapport à la teneur maxima fixée arbitrairement à 100, prennent par époque les valeurs suivantes :

	4 juin	18 juin	2 juillet	10 août	3 sept.
Cendres solubles	72,76	100,00	84,25	34,75	30,49
Cendres insolubles ..	100,00	81,00	62,29	56,74	54,09

A tout moment la teneur en cendres insolubles est supérieure à la teneur en cendres solubles.

A la maturité, la matière sèche est extrêmement pauvre en sels solubles ; elle contient à ce stade seulement 30,49 % de la quantité contenue un peu avant la floraison.



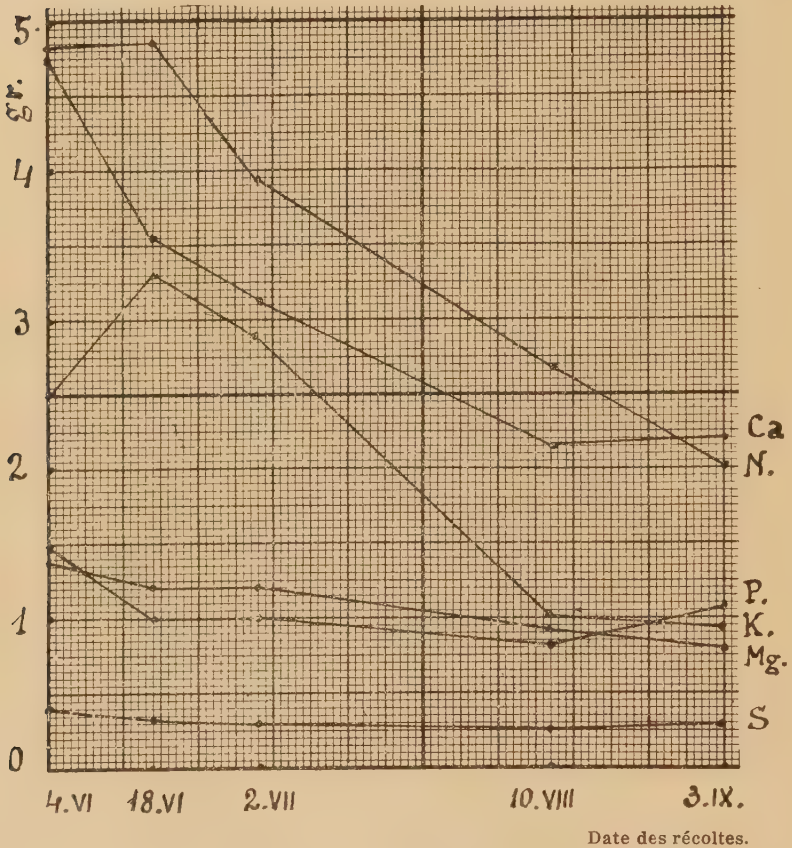
GRAPHIQUE n° 11. — Pour 100 grammes de matière sèche.

Dans la composition des cendres totales entrent les proportions suivantes de cendres solubles et insolubles :

	4 juin	18 juin	2 juillet	10 août	3 sept.
Cendres solubles % de cendres totales	21,67	31,94	33,94	18,89	17,65
Cendres insol. % de cendres totales	78,33	68,06	66,06	81,11	82,35

Jusqu'à l'époque de la floraison la proportion de cendres solubles augmente, ensuite elle diminue assez brusquement.

Dans le sarrasin, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène augmentent avec l'âge; par contre l'azote diminue. La matière végétale organique (matière sèche moins les éléments



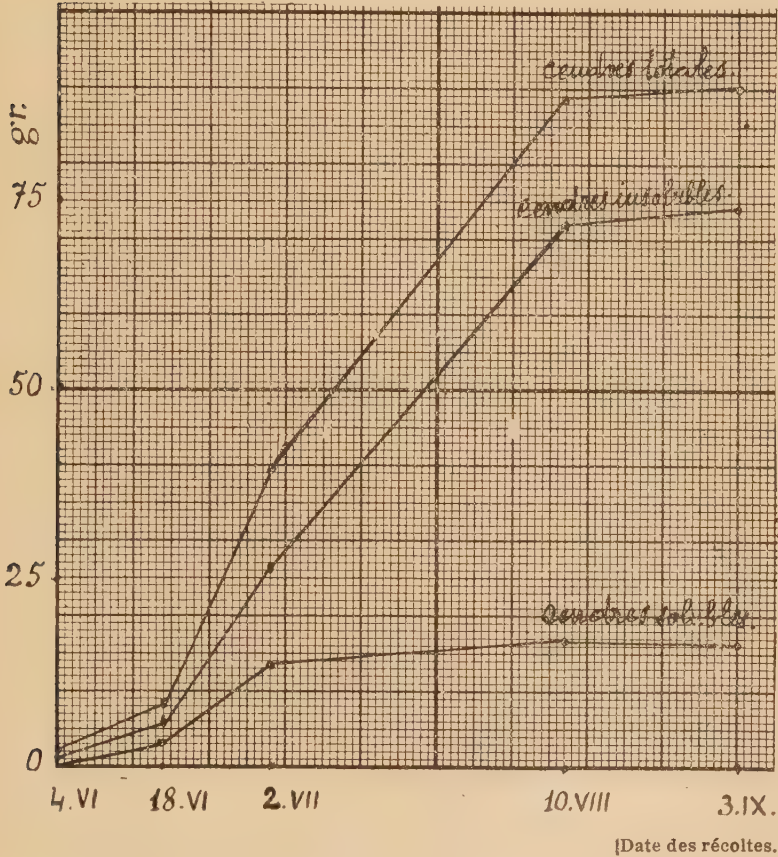
GRAPHIQUE n° 12. — Pour 100 grammes de matière sèche.

minéraux) s'enrichit en carbone et en oxygène avec l'âge mais elle contient moins d'hydrogène et surtout moins d'azote à la maturité qu'au début de la végétation.

Le soufre, le phosphore, le calcium, le fer, le manganèse et le silicium, éléments qui se trouvent en proportions maxima

dès le début de la végétation, diminuent jusqu'à l'époque de la maturation et augmentent un peu à la maturité complète (graphique n° 12).

Le potassium croît jusqu'au début de la floraison où il



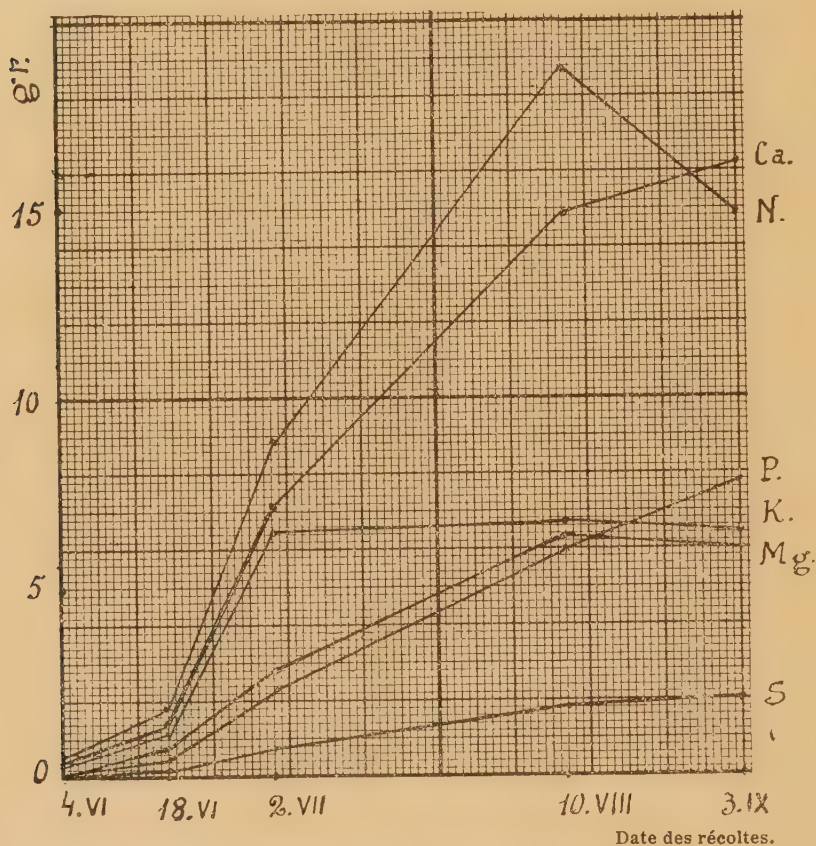
GRAPHIQUE n° 13. — Pour 100 plantes.

atteint la plus forte proportion, diminue de peu pendant l'époque de la floraison et tombe à un taux très bas durant la maturation.

Le magnésium diminue à mesure que la végétation avance.

Composition des cendres.

Le soufre, le phosphore, le calcium, le magnésium, le fer, le manganèse, et le silicium éprouvent une faible diminution



GRAPHIQUE n°14. — Pour 100 plantes.

peu avant la floraison et ensuite leurs proportions augmentent jusqu'à la maturité complète.

La teneur en potassium augmente durant les premières époques, atteint la valeur maxima pendant la floraison et diminue ensuite.

De l'analyse de 100 plantes, il résulte que tous les éléments ont augmenté avec l'âge jusqu'à la maturité complète, sauf l'azote, le potassium et le magnésium qui ont légèrement diminué à la fin de la maturation (graphique n° 13 et n° 14).

Rangés d'après la grandeur décroissante de leur teneur les éléments entrant dans la composition du sarrasin arrivé à l'époque de la floraison, s'inscrivent dans l'ordre suivant :

1° oxygène, 2° carbone, 3° hydrogène, 4° azote, 5° calcium, 6° potassium, 7° magnésium, 8° phosphore, 9° soufre, 10° silicium, 11° sodium, 12° fer et 13° manganèse.

Le sarrasin est extrêmement pauvre en sodium ; on trouve seulement quelques dizaines de milligrammes par kilo de matière sèche, donc tout aussi peu abondant qu'est le fer, élément à rôle catalytique.

Il est à remarquer que le sarrasin contient autant de phosphore que de magnésium et trois à quatre fois plus de phosphore que de soufre. La valeur du rapport S/P varie d'ailleurs peu d'une époque à l'autre et est comprise entre 0,26 et 0,32.

La teneur en calcium est environ trois fois plus grande que la teneur en magnésium.

Les valeurs des rapports C/élément et C + H + O + N/élément, passent au cours de la végétation du simple au double environ ; pour l'azote et le potassium ces variations sont un peu plus grandes.

IV. — ÉTUDE DE LA LUZERNE

J'ai étudié la luzerne durant deux années de végétation. L'ensemencement a été pratiqué le 30 avril 1932 ; dans cette année la saison a été particulièrement sèche et seulement deux récoltes ont pu être effectuées.

Pendant l'année 1933, la luzerne, entrée dans sa deuxième année de végétation, a été étudiée à quatre stades de son développement.

J'ai également analysé trois récoltes d'une vieille luzerne, datant de 5 années.

Voici les détails de toutes ces récoltes :

Luzerne (première année de végétation, 1932).

1^o le 29 juin : jeune plante portant les premières feuilles.

Longueur des parties aériennes 17 cm. environ.

2^o le 16 juillet : plante non fleurie.

Longueur des parties aériennes 26 cm. environ.

Luzerne (deuxième année de végétation, 1933).

1^o le 20 juin : avant la floraison.

Longueur des parties aériennes 35 cm. environ.

2^o le 26 juillet : pendant la floraison.

Longueur des parties aériennes 65 cm. environ.

3^o le 24 août : pendant la maturation des graines.

Longueur des parties aériennes 75 cm. environ.

4^o le 3 septembre : à la maturité complète.

Longueur des parties aériennes 75 cm. environ.

Luzerne ancienne récoltée en 1932.

1^o le 20 juin : avant la floraison.

2^o le 10 août : vers la fin de la floraison.

3^o le 20 septembre : à la maturité complète.

Les résultats des analyses se trouvent inscrits dans les tableaux pages 98 à 101.

ANALYSE DE LA LUZERNE

REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS

LUZERNE. — Composition chimique : parties aériennes.

	Date des récoltes 1932				Date des récoltes 1933				Date des récoltes 1932			
	Première année de végétation				Deuxième année de végétation				Culture ancienne			
	29 juin	16 juillet	20 juin	26 juillet	24 août	3 sept.	20 juin	20 sept.	10 août	20 sept.	10 août	20 sept.

Teneur exprimée en grammes % de matière fraîche :

Eau	81,76	80,45	81,64	75,03	72,80	72,31	79,90		78,78		69,34	
Matière sèche	18,24	19,55	18,36	24,97	27,20	27,69	20,10		21,22		30,66	
Cendres totales	1,99	2,17	1,92	2,43	2,60	2,45	2,05		2,13		2,88	
Carbone	8,30	8,54	8,24	11,32	12,45	12,63	9,29		9,57		14,16	
Azote	0,727	0,642	0,6767	0,8235	0,8111	0,7794	0,686		0,725		0,816	
Soufre	0,0960	1,1134	0,0920	0,1085	0,0935	0,1221	0,0966		0,1014		0,1583	
Phosphore	0,0693	0,0689	0,0745	0,0705	0,0743	0,0788	0,0792		0,0788		0,0811	
Sodium	0,0404	0,0350	0,0367	0,0392	0,0550	0,0730	0,0236		0,0224		0,0646	
Potassium	0,2736	0,2080	0,2490	0,2163	0,2254	0,1794	0,2817		0,3333		0,2049	
Calcium	0,4014	0,5095	0,4296	0,5768	0,5692	0,6191	0,4371		0,4454		0,6841	
Magnésium	0,0955	0,0993	0,0689	0,0822	0,0943	0,0848	0,0538		0,0488		0,0739	

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière fraîche :

Fer	13,71	19,36	22,37	25,71	36,72	35,12	16,59		16,13		22,92	
Manganèse	3,08	3,95	3,08	3,60	4,64	3,93	3,39		2,93		5,17	
Silicium	41,81	16,87	70,80	92,40	152,42	130,21	61,00		38,75		145,43	

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche :

Cendres totales	10,92	11,13	10,46	9,74	9,58	8,87	10,19		10,01		9,37	
Cendres solubles	3,92	3,01	3,68	3,14	2,57	2,45	3,36		3,68		2,33	
Cendres insolubles	7,00	8,12	6,78	6,60	7,01	6,42	6,83		6,33		7,04	
Carbone	45,51	43,71	44,89	45,37	45,78	45,62	46,25		45,13		46,20	
Hydrogène	5,70	6,03	5,66	5,54	5,67	5,67	5,52		5,91		6,09	
Oxygène	39,37	41,67	40,53	41,32	41,42	41,65	39,95		40,66		40,87	
Azote	3,990	3,285	3,686	3,298	2,982	2,815	3,409		3,431		2,661	

Soufre	0,5265	0,5804	0,5011	0,4348	0,3434	0,4403	0,4802	0,4777	0,5161
Phosphore	0,4343	0,3529	0,4059	0,2824	0,2732	0,2844	0,3942	0,3721	0,2642
Sodium	0,2215	0,1790	0,1999	0,1572	0,2022	0,2635	0,1171	0,1057	0,2102
Potassium	1,4984	1,0643	1,3561	0,9061	0,8285	0,6479	1,3993	1,5692	0,6666
Calcium	2,1994	2,6050	2,3393	2,3098	2,0915	2,2355	2,1741	2,0984	2,2264
Magnésium	0,5230	0,5080	0,3756	0,3290	0,3466	0,3064	0,2678	0,2301	0,2408

Teneur exprimée en milligrammes par kilogramme de matière sèche :

Fer	75,14	99,07	121,82	102,86	134,98	126,52	82,51	75,93	95,22
Manganèse.....	16,91	20,24	16,77	14,42	17,05	14,18	16,88	13,79	16,85
Silicium	220,17	83,36	385,51	370,10	560,07	470,43	303,01	182,63	474,41

Teneur exprimée en grammes % de matière sèche, dépourvue d'éléments minéraux :

Carbone	48,12	46,16	47,37	47,49	47,76	47,64	48,61	47,44	48,21
Hydrogène	6,02	6,36	5,97	5,79	5,91	5,92	5,80	6,21	6,35
Oxygène	41,63	44,00	42,77	43,25	43,21	43,49	41,99	42,74	42,65
Azote	4,22	3,47	3,89	3,45	3,11	2,94	3,58	3,60	2,77

Teneur exprimée en grammes % de cendres totales :

Soufre	4,8214	5,2111	4,7906	4,4640	3,5845	4,9639	4,7105	4,7752	5,5069
Phosphore	3,9743	3,1716	3,8805	2,8993	2,8517	3,2063	3,8665	3,7162	2,8175
Sodium	2,0281	1,6100	2,0131	1,6132	2,1105	2,9698	1,1507	1,0560	2,2168
Potassium	13,7183	9,5691	13,6542	9,3001	8,6487	7,3609	13,7439	15,6800	7,1084
Calcium	20,3620	23,3235	22,3629	23,7145	21,8319	24,8946	21,4537	21,3303	24,5833
Magnésium	4,8420	4,5481	3,5908	3,3778	3,6179	3,4119	2,6327	2,3394	2,6562

Teneur exprimée en milligrammes % grammes de cendres totales :

Fer	69,57	88,32	119,43	106,04	142,08	142,96	78,60	75,93	101,29
Manganèse.....	15,37	17,84	16,03	14,86	17,95	15,79	16,55	13,79	17,92
Silicium	208,33	75,65	368,52	379,90	584,63	530,34	297,32	182,41	506,32

LUZERNE. — Composition de 100 plantes (parties aériennes).

	Date des récoltes 1932				Date des récoltes 1933			
	Première année de végétation				Deuxième année de végétation			
	20 juin	16 juillet	20 juin	26 juillet	24 août	3 septembre	20 juin	20 septembre
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Matière fraîche	31,19	77,63	392,85	740,00	1000,00	1300,00		
Matière sèche	5,69	15,17	72,14	184,80	272,00	360,00		
Eau	25,50	62,46	320,71	555,20	728,00	940,00		
Cendres totales	0,621	1,689	7,546	17,999	26,057	31,932		
Cendres solubles . . .	0,223	0,457	2,653	5,803	6,990	8,820		
Cendres insolubles . .	0,398	1,232	4,891	12,197	19,067	23,112		
Carbone	2,588	6,633	32,383	83,844	124,521	164,232		
Hydrogène	0,324	0,915	4,083	10,238	15,422	20,412		
Oxygène	2,239	6,321	29,238	76,359	112,662	149,940		
Azote	0,227	0,497	2,659	6,095	8,105	10,134		
Soufre	0,0299	0,0881	0,3614	0,8035	0,9340	1,5850		
Phosphore	0,0247	0,0535	0,2928	0,5218	0,7431	1,0238		
Sodium	0,0126	0,0272	0,1442	0,2905	0,5499	0,9486		
Potassium	0,0852	0,1615	0,9782	1,6744	2,2535	2,3324		
Calcium	0,1251	0,3953	1,6875	4,2685	5,6888	8,0478		
Magnésium	0,0297	0,0771	0,2709	0,6079	0,9427	1,1030		
Teneur exprimée en milligrammes :								
Fer	0,43	1,50	8,79	19,01	36,71	45,55		
Manganèse	0,09	0,30	1,21	2,66	4,64	5,10		
Silicium	1,30	1,31	27,81	68,39	152,32	169,20		
Carbone :								
Cendres totales	4,16	3,92	4,29	4,65	4,78	5,14		
Cendres solubles . . .	11,60	14,52	12,19	14,45	17,81	18,62		
Cendres insolubles . .	6,50	5,38	6,62	6,87	6,53	7,10		

LUZERNE. — Les rapports.

	Date des récoltes 1932			
	Culture ancienne			
	20 juin	10 août	20 septembre	
	4,53	4,51	4,93	
	13,76	12,26	19,82	
	6,77	7,12	6,56	

Hydrogène	7,98	7,25	7,93	8,18	8,07	8,04	8,37	7,64	7,58
Oxygène	1,15	1,04	1,11	1,10	1,10	1,09	1,15	1,11	1,13
Azote	11,40	13,32	12,18	13,75	15,36	16,21	13,56	13,12	17,36
Soufre	86,57	75,29	89,60	104,41	133,32	103,61	96,31	94,47	89,51
Phosphore	104,80	123,98	110,59	160,62	167,59	160,38	117,32	121,28	174,86
Sodium	205,44	243,86	224,57	289,11	226,40	173,25	394,96	426,96	219,17
Potassium	30,38	41,07	33,05	50,08	55,27	70,42	33,05	28,76	69,30
Calcium	20,69	16,78	19,19	19,64	21,44	20,41	21,27	21,50	20,75
Magnésium	87,15	86,03	119,54	137,90	132,05	148,89	172,70	196,13	191,86
Fer	6018,60	4422,00	3684,97	4412,84	3392,04	3605,53	5606,06	5938,15	4852,94
Manganèse.....	26958,33	22110,00	26785,44	31520,30	26836,63	32202,35	27205,88	32702,89	27500,00
Silicium	1990,76	5063,35	1164,45	1255,96	817,50	970,63	1541,66	2466,12	973,86

C+H+O+N :

Cendres totales	8,66	8,50	9,05	9,80	10,00	10,79	9,33	9,50	10,22
Cendres solubles ...	24,11	31,44	25,74	30,42	37,29	39,08	28,31	25,84	41,12
Cendres insolubles ..	13,51	11,66	13,97	14,47	13,67	14,91	13,92	15,02	13,61
Soufre	179,26	163,29	189,37	219,84	279,13	217,48	198,18	198,99	185,69
Phosphore	215,12	268,59	233,32	338,19	350,88	336,63	241,44	255,69	362,95
Sodium	426,82	528,30	474,74	608,74	474,01	363,62	813,07	897,35	456,28
Potassium	63,12	88,97	69,90	105,45	115,71	147,82	67,99	60,62	143,65
Calcium	43,02	36,35	40,52	41,36	45,82	42,83	43,75	45,33	43,04
Magnésium	181,07	186,62	252,26	290,35	276,46	312,53	354,96	413,56	397,59
Fer	12506,97	9580,00	7768,52	9291,36	7101,87	7567,90	12533,59	12532,27	10065,12
Manganèse.....	56020,83	47900,00	56498,34	66366,91	56187,50	67591,76	56289,94	68927,53	57035,71
Silicium	4136,92	10969,46	2458,21	2581,31	1711,59	2037,34	3139,60	5197,81	2019,81
Soufre : Phosphore .	1,21	1,64	1,23	1,54	1,25	1,55	1,22	1,28	1,95
Potassium : Sodium	6,76	5,93	6,78	5,76	4,09	2,46	11,95	14,84	3,17
Calcium :Magnésium	4,20	5,12	6,23	7,02	6,03	7,29	8,11	9,12	9,24

Evolution de la composition chimique de la luzerne au cours de son développement.

Les résultats analytiques groupés dans les tableaux précédents, donnent lieu aux observations suivantes :

Composition de la matière fraîche :

Considérée à l'état frais, la matière végétale est plus pauvre en cendres au début de la végétation qu'à la fin.

La majorité des éléments se trouve en plus grande abondance à la fin de la végétation qu'au début.

Le potassium présente une tendance à diminuer, plus particulièrement à la maturité complète. La proportion d'azote diminue pendant la maturation des graines.

Composition de la matière séchée à 100° C.

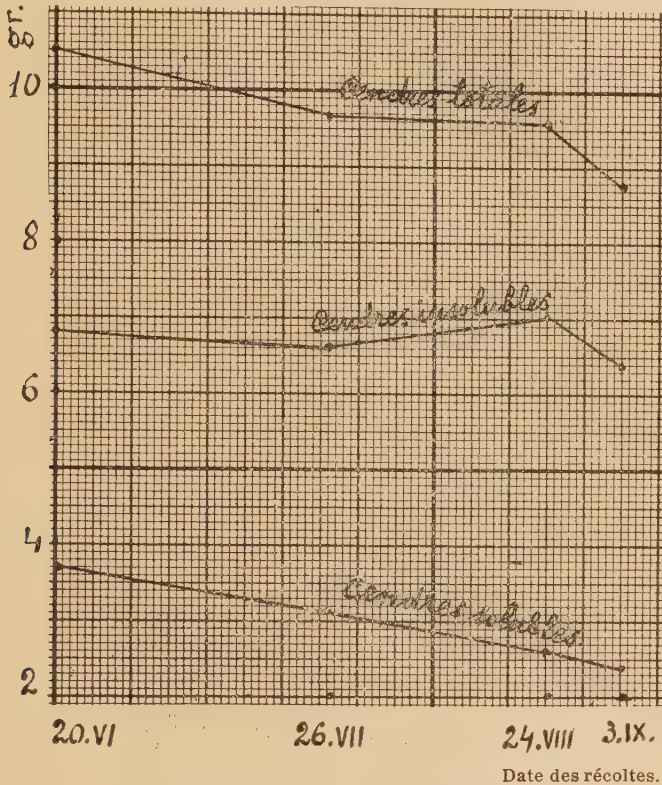
Par rapport à la matière sèche les proportions de cendres totales et de cendres solubles diminuent à mesure que la végétation avance. La proportion de cendres insolubles augmente et atteint son maximum au début de la période de maturation (graphique n° 15).

Les proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène augmentent légèrement d'une époque à l'autre, pendant toute la végétation. Par contre, la proportion d'azote diminue à mesure que la végétation avance, mais relativement peu d'une époque à l'autre.

La plupart des éléments se trouvent en proportions maxima au début de la végétation (graphique n° 16).

Le soufre, le phosphore et le calcium, après avoir diminué au cours de la végétation, éprouvent une légère augmentation à la maturité complète. Le sodium augmente très sensiblement pendant la période de maturation des graines. La proportion de magnésium croît pendant la formation des

graines et diminue à la maturité. Les proportions de fer et de manganèse paraissent diminuer un peu mais elles augmentent pendant la maturation suffisamment pour arriver à



GRAPHIQUE n° 15. — Pour 100 grammes de matière sèche.

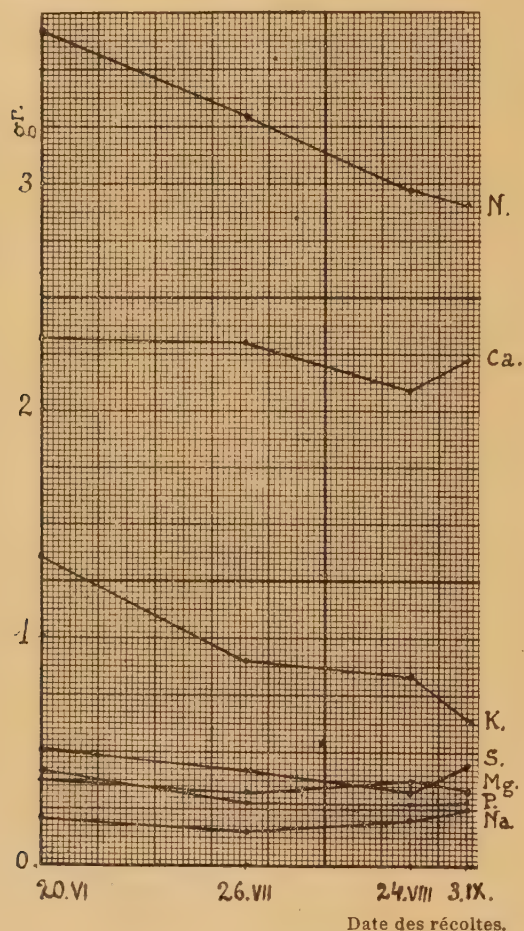
dépasser la teneur du début de la végétation. Le silicium augmente avec l'âge.

Composition des cendres.

Les proportions de soufre et de phosphore, après avoir diminué au cours des premières époques de développement, augmentent à la maturité.

Le sodium diminue d'abord et augmente ensuite très sensiblement pendant la période de maturation.

Le potassium diminue à mesure que la végétation avance.



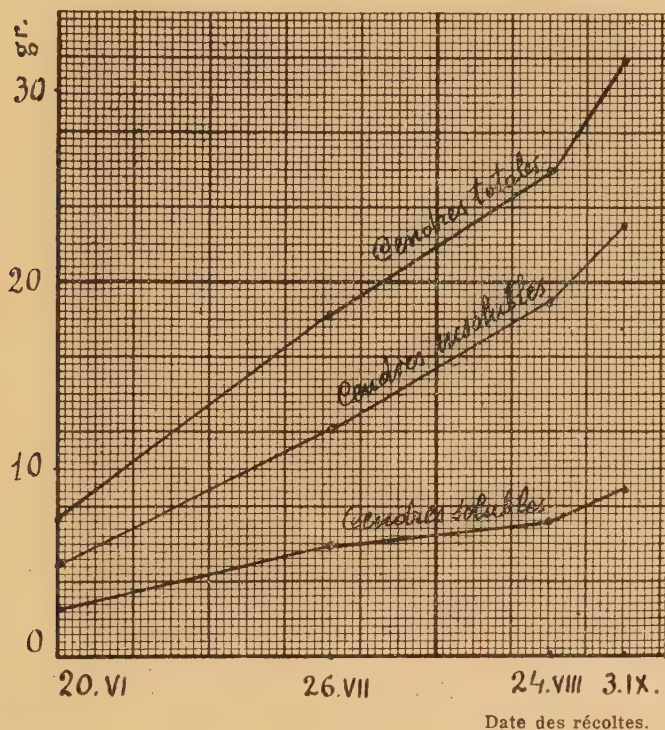
GRAPHIQUE n° 16. — Pour 100 grammes de matière sèche.

Le silicium augmente avec l'âge. Le fer et le manganèse sont abondants au début et vers la fin de la végétation.

De l'analyse de 100 plantes il résulte que le poids de la matière vivante ainsi que les poids de tous les éléments

considérés à part, augmentent avec l'âge jusqu'à la maturité complète (graphique n° 17 et n° 18).

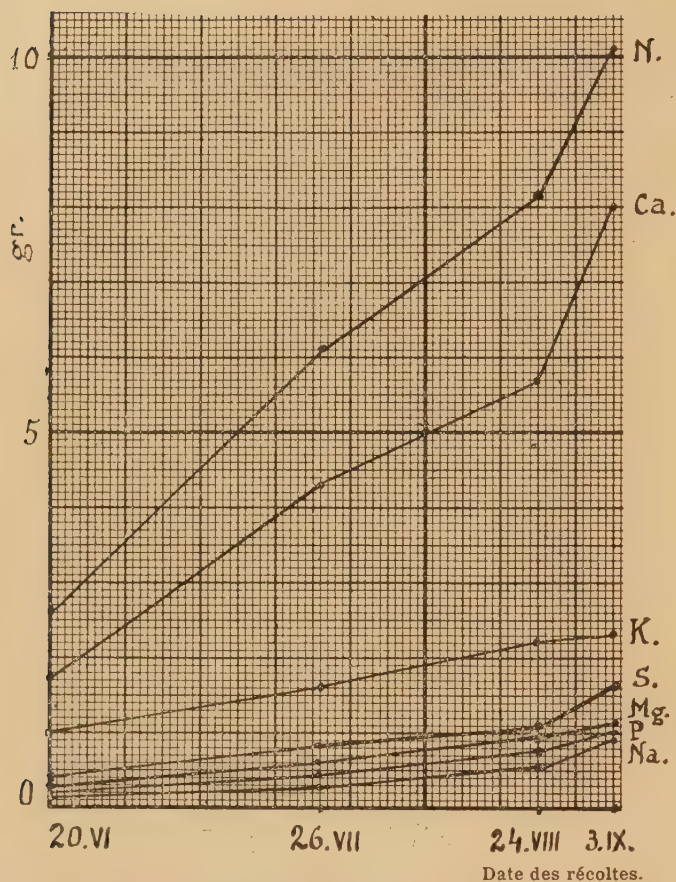
Rangés d'après la grandeur décroissante de leur teneur, les éléments entrant dans la composition de la luzerne arrivée à l'époque de la floraison, s'inscrivent dans l'ordre suivant :



GRAPHIQUE n° 17. — Pour 100 plantes.

1° carbone ; 2° oxygène ; 3° hydrogène ; 4° azote ; 5° calcium ; 6° potassium ; 7° soufre ; 8° silicium ; 9° magnésium ; 10° phosphore ; 11° sodium ; 12° fer ; 13° manganèse.

On remarque que le calcium est très abondant dans la luzerne ; qu'il y a plus de soufre que de phosphore — la valeur du rapport S/P étant environ 1,60 — et enfin qu'il y a tout autant de phosphore que de magnésium.



GRAPHIQUE n° 18. — Pour 100 plantes.

Les valeurs des rapports C/élément et $C + H + O + N$ /élément sont comparables dans les deux récoltes de luzerne, considérées au même stade de développement.

Conclusions.

Dans ce travail j'ai étudié l'évolution avec l'âge de la composition chimique élémentaire de quatre plantes différentes :

l'avoine et le sarrasin, dont la caractéristique principale est la richesse des graines en matières glucidiques ;

le colza, dont les graines sont riches en matières grasses ;

la luzerne, riche en matières azotées.

Cette étude m'a permis de dégager un certain nombre de conclusions générales pouvant s'appliquer aux quatre plantes et également des conclusions qui sont particulières à chacune d'elles et en rapport avec la formation des principes immédiats caractérisant la nature des graines au moment de la maturité.

A. — OBSERVATIONS COMMUNES AUX QUATRE PLANTES.

1^o Toutes les plantes se déshydratent à mesure qu'elles vieillissent ; le degré de déshydratation est différent d'une espèce à l'autre, même si elles sont venues toutes sur le même terrain, dans les mêmes conditions et se trouvent au même stade de développement.

2^o D'une façon générale, la matière végétale considérée à l'état frais est plus riche en substances minérales à la maturité qu'au début de la végétation.

Dans 100 grammes de matière séchée à 100° C.

3° Les proportions de cendres totales et de cendres solubles sont maxima au début de la végétation : ces proportions diminuent à mesure que la végétation avance.

4° Au début de la végétation la matière végétale est généralement plus riche en azote et en éléments minéraux qu'à la fin.

5° L'azote diminue à mesure que la plante vieillit.

6° Le soufre, le phosphore et le magnésium diminuent à mesure que la végétation avance et peuvent légèrement augmenter à la maturité complète.

7° La teneur en potassium devient maxima dans la première période de végétation, peu avant la floraison, et diminue ensuite.

8° Le fer se trouve généralement en plus grande abondance au début et à la fin de la végétation que pendant les autres périodes.

9° Le sodium présente pendant la première partie de la végétation une tendance à diminuer mais il peut augmenter sensiblement vers la fin.

10° Le manganèse est très abondant au début de la végétation, diminue ensuite et vers la fin il peut, suivant le cas, rester à peu près constant ou augmenter suffisamment pour arriver à dépasser la teneur du début.

11° Les valeurs des rapports $C/\text{élément}$ et $C + H + O + N/\text{élément}$ varient le plus souvent environ du simple au double au cours de la végétation ; considérés pour deux cultures d'une même plante venue sur le même terrain, dans les mêmes conditions mais dans des années différentes, on constate que les valeurs de ces rapports sont très comparables, pour un même stade de végétation.

Dans 100 plantes.

12° Le poids absolu de la matière végétale et le poids absolu de chaque élément considéré à part, augmentent dans

une plante durant la végétation jusqu'à la maturité des graines.

B. — OBSERVATIONS MARQUANT UNE DIFFÉRENCE
ENTRE LES QUATRE PLANTES.

Dans 100 grammes de matière séchée à 100°.

1° La plus forte proportion de cendres insolubles se trouve dès le début de la végétation, dans le colza et le sarrasin ; elle ne se présente qu'à l'époque de la maturation, pour l'avoine et la luzerne.

2° Le silicium augmente avec l'âge chez l'avoine ; dans les autres plantes cet élément diminue jusqu'à l'époque de la floraison et ensuite il augmente, atteignant la valeur maxima à la maturité complète.

3° Le calcium augmente avec l'âge chez l'avoine ; pour les autres plantes la proportion de calcium diminue à mesure que la végétation avance et augmente très peu à la maturité complète.

4° En ce qui concerne la matière organique, sa composition chimique élémentaire est en relation étroite avec la nature des principes immédiats qui se forment en abondance dans la plante, plus particulièrement après la floraison.

En résumé :

a) Pour les plantes dont la maturation des graines est accompagnée d'une élaboration de matières grasses en forte abondance, la matière organique éprouve à ce moment un enrichissement tout particulier en carbone (colza).

b) La matière organique des plantes dont les graines sont très riches en matières glucidiques (amidon) contient une forte proportion d'oxygène à l'époque de la maturation des graines (avoine, sarrasin).

C. — REMARQUES D'ORDRE PRATIQUE.

La matière végétale considérée à l'état sec est, à poids égal, plus riche en substances minérales quand elle est jeune

que dans un stade de végétation plus avancé. Il est recommandable d'effectuer la récolte des plantes fourragères quand elles sont jeunes ou tout au moins, pour conserver un rendement convenable, au début de la floraison si on cherche à obtenir un fourrage sec concentré en substances minérales. Cette pratique s'impose dans l'alimentation des animaux dont l'organisme souffre d'une déficience minérale.

Les résultats de ces dosages donnent une idée des quantités de matières minérales dont une plante doit disposer pour accomplir son développement normal. Si une partie de ces matières doit être apportée sous forme d'engrais, les résultats de ces analyses permettent de connaître dans quel rapport doivent se trouver entre eux les quelques éléments qui entrent généralement dans la composition d'un engrais.

Il faut par exemple :

tout autant de phosphore que de soufre et de trois à quatre fois plus de potassium que de phosphore pour une culture d'avoine ;

environ deux fois plus de soufre que de phosphore et presque autant de potassium que de calcium pour une culture de colza ;

tout autant de phosphore que de magnésium et seulement trois fois moins de magnésium que de calcium pour une culture de sarrasin (plante pourtant particulièrement riche en calcium) etc...

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

1. ACHARYA (Narasimha). 1931. — The relation between growth and intake of nutrients in the cholam plant (*Madras Agr. J.*, 19, 157).
2. AGULHON (H.). 1910. — Emploi du bore comme engrais catalytique (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 150, p. 288).
3. ANDRÉ (G.). 1910. — Sur la conservation des matières salines pendant le cours de la végétation d'une plante annuelle (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 151, p. 1378).
4. ANDRÉ (G.). 1912. — Sur l'évolution de l'azote, du phosphore, et du soufre au cours de la végétation de l'orge (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 154, p. 1627).
5. ANDRÉ (G.). 1912. — Sur la distribution des bases minérales chez l'orge au cours de l'évolution de ce végétal (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 154, p. 1817).
6. ANDRÉ (G.). 1913. — Sur l'évolution des principes minéraux et de l'azote chez quelques plantes annuelles (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 156, p. 1164).
7. ARCHIBALD (J. G.). 1930. — The chemical composition of grass from plot fertilized and grazed intensively in 1929 (*J. Agr. Research.*, 41, p. 491).
8. BERTHELOT (M.). 1899. — Chimie végétale et agricole. Recherches générales sur la végétation. Action chimique de la lumière. Paris.
9. BERTHELOT et ANDRÉ. 1887. — Sur l'état du soufre et du phosphore dans les plantes, la terre et le terreau et leur dosage (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 105, p. 1217 et *Ann. de Chim. et Phys.*, 6^e série, t. 15, p. 119, 1888).
10. BERTHIER (P.). 1826. — Analyses des cendres de diverses espèces de bois (*Ann. Phys. et Chim.*, 2^e série, t. 32, p. 240).
11. BERTHIER (P.). 1834. — *Traité des essais*, t. 1, p. 259. Paris.
12. BERTHIER (P.). 1851. — Recherches des substances inorganiques dans les sarments de vigne, ainsi que dans les feuilles, dans le raisin et dans les pépins (*Ann. Chim. et Phys.*, 3^e série, t. 33, p. 249).

13. BERTRAND (Gab.). 1903. — Sur les engrais catalytiques (*Bericht. Internat. congress. Berlin*, t. 3, p. 839).
14. BERTRAND (Gab.). 1906. — Les engrais catalytiques (*Congres. Internat. Chimie. Rome*).
15. BERTRAND (Gab.). 1907. — Le caoutchouc et la Gutta Percha, t. 4, p. 1201.
16. BERTRAND (Gab.). 1909. — Sur les engrais catalytiques (*VII^e Congrès de Chimie appliquée. Londres*).
17. BERTRAND (Gab.). 1911. — Recherche et dosage de petites quantités de manganèse en particulier dans les substances organiques (*Bull. Soc. Chim.*, 4^e série, t. 9, p. 361).
18. BERTRAND (Gab.). 1912. — Sur le rôle des infiniment petits en agriculture (Reprinted from transactions and organization, eighth international congress of applied chemistry, t. 28, p. 30. Conférence reproduite dans *Ann. Inst. Pasteur*, t. 26, p. 852).
19. BERTRAND (Gab.) et PERIETZEANU (D. J.). 1928. — Sur la présence du sodium chez les plantes (*Ann. Sc. agron.*, 45, p. 77). Sur les proportions relatives de potassium et de sodium chez les plantes (*Ann. Sc. agron.*, 45, p. 82).
20. BERTRAND (Gab.) et ROSENBLATT (M^{me}). 1922. — Sur la répartition du manganèse dans l'organisme des plantes supérieures (*Ann. Inst. Pasteur*, 36, p. 230).
21. BERTRAND (Gab.) et ROSENBLATT (M^{me}). Recherches sur les variations de la teneur en manganèse des feuilles avec l'âge (*Ann. Inst. Pasteur*, 36, p. 494).
22. BERTRAND (Gab.) et SILBERSTEIN (L.). 1929. — Sur le dosage du soufre et du phosphore dans les plantes (*C. R. Ac. Sc. Paris*, 189, p. 886).
23. BERTRAND (Gab.) et THOMASSIN. 1905. — Sur l'emploi favorable du manganèse comme engrais (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 141, p. 1255).
24. BOUSSINGAULT. 1843. — Economie rurale.
25. BOUSSINGAULT. 1858. — Statique des cultures industrielles de l'Alsace (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 46, p. 1007).
26. BOUSSINGAULT. 1860. — Agronomie, Chimie agricole et Physiologie. Paris.
27. BRAUN et BELLINGRODT. 1854. — Ueber das Vorkommen von Zink im Pflanzenreich (*Poggendorfs Annalen*, t. 92, p. 175).
28. BRYNER (C. Jones). 1928. — The feeding value of meadow hay cut at different dates (*Welsh. J. Agr.*, 4, p. 75).
29. BURD (S. John). 1919. — Rate of absorbtion of soil constituents at successive stages of Plant growth (*J. Agr. Research*, t. 18, n° 2, p. 51).

30. CANALS (E.). 1920. — Du rôle physiologique du magnésium chez les végétaux (Thèse doctorat Sc. Paris).
31. CANDOLLE (De). 1832. — Physiologie végétale, ou exposition des forces et des fonctions vitales des végétaux. Paris.
32. CHAPTAL (Comte). 1823). — Chimie appliquée à l'Agriculture. Paris.
33. CHODAT, MONNIER et DELEANO. 1907. — Sur l'accroissement des végétaux et sur l'absorption des substances minérales (*Bull. de l'Herbier Boissier*, t. 7, n° 4, p. 1907 et 2^e série, p. 948).
34. DÉHERAIN (P. P.). 1865. — Recherches sur l'assimilation des substances minérales par les plantes (*Ann. des Sciences naturelles*, 5^e série, t. 8, 3^e cahier. Mémoire couronné par l'Académie des Sciences).
35. DÉHERAIN (P.) et BRÉAL (E.). 1881. — Recherches sur la maturation de quelques plantes herbacées (*Ann. agron.*, t. 7, p. 161).
36. DÉHERAIN (P.) et MAYER 1881. — Recherches sur le développement de l'avoine (*Ann. agron.*, t. 7, p. 197).
37. DEMOUSSY (Em.). 1898. — Absorption élective des quelques éléments minéraux par les plantes (*C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 127, p. 970).
38. DEMOUSSY (Em.). 1899. — Absorption par les plantes de quelques sels solubles (Thèse doctorat. Paris).
39. DOMBASLE (Mathieu). — Agronomie, chimie agricole et physiologie, de Boussingault, p. 135.
40. FAGAN (T. W.) and EVAN (R. E.). 1926. — The influence of the date of enclosing field for hay upon the yield and chemical composition of the crop (*Welsh J. Agr.*, 2, p. 134).
41. FAGAN (T. W.) and REES (John). 1930. — The effect of cutting sainfoin at different stages on the yield and chemical composition of hay and aftermath. (*Welsh. J. Agr.*, 6, p. 224).
42. FLICHE (P.) et GRANDEAU (L.). 1876. — Recherches chimiques sur la composition des feuilles. Modifications résultant de l'âge et de l'espèce (*Ann. Chim. et Phys.*, 5^e série, t. 8, p. 486).
43. GARREAU (L.). 1860. Recherches sur la distribution des matières minérales fixes dans les divers organes des plantes (*Ann. Sc. nat. Bot.*, p. 145, t. 13, 4^e série).
44. GEOFFROY. — Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences, le 12 novembre 1704. Paris, 1745, p. 278.
45. GRANDEAU (L.). 1863. — Recherches du rubidium et du caesium dans les eaux minérales, les végétaux et les minéraux (*Ann. Chim. et Phys.*, t. 67).

46. GREENHILL (A. W.). 1930. — Investigations into the intensive system of grassland management. The chemical composition of intensively treated Pasture (*J. Agr. Sc.*, 20, p. 573).
47. HASELHOFF (E.), HAUN (Fr.) und EBBERT (W.). 1931. — Versuche Über die Nährstoffaufnahme der Pflanzen (*Landw. Versuchsstat.* Band 111, S. 11).
48. HÖNL (Victor). 1930. — Über die Energiespeicherung der Pflanzen mit Berücksichtigung ihres Kohlenstoff und Stickstoffgehaltes (*Biochem. Z.*, 225, S. 94).
49. JAVILLIER (M.). 1908. — Recherches sur la présence et le rôle du zinc chez les plantes (Thèse doct. Sc. Nat., 1908).
50. JAVILLIER (M.). 1909. — Sur l'emploi du zinc comme engrais complémentaire (*VII^e Congrès de Chimie appliquée Londres*).
51. JOULIE (H.). 1894. — Sur la composition et les exigences des céréales (*Moniteur Scientifique*. Quesneville, t. 8, p. 641, 731, 807, 886).
52. KAISTEN (J.) and KRISTENSEN (A. R.). 1918. — The influence of date of cutting of the food value of hay experiments carried-out in Danemark (*Tids for Planteavt*, 24, 405; *Bull. Agr. Intelligence*, 9, p. 209).
53. KIRWAN. — Mémoire sur les engrais (*Société Royale d'Irlande*, t. 5, p. 129).
54. KNOWLES (Frank) and WATKIN (J. E.). 1932. — The amounts and distribution of some phosphorus and Nitrogen compounds in wheat during growth (*J. Agr. Sc.*, 22, p. 755).
55. LIEBIG (Justus). 1844. — Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture, traduit par Charles Gerhardt, 2^e édition. Paris.
56. LIEBIG (Justus). 1862. — Les lois naturelles de l'Agriculture, t. 2, p. 66.
57. MALAGUTI et DUROCHER. 1858. — Recherches sur la répartition des éléments inorganiques dans les principales familles du règne végétal (*Ann. Chim. et Phys.*, 3^e série, t. 54, p. 257).
58. MALHOTRA (R. C.). 1932. — The distribution of some reserve substances in hard winter wheat plant at successive growth stages and their possible utilisation (*J. Agr. Sci.*, 22, p. 485).
59. MAQUENNE (M.). 1878. — Recherches sur la végétation de quelques plantes oléagineuses (*Ann. Agron.*, t. 4, p. 50).
60. MAQUENNE (M.). 1921. — Sur le dosage de très petites quantités de fer (*Bull. Soc. Chim.*, t. 29, p. 585).
61. MAQUENNE et CERIGHELLI. 1921. — Sur la distribution du fer dans les organes végétaux (*Bull. Soc. Chim.*, t. 29, p. 899).

62. MARIÉ (Davy). 1874. — *Bull. mensuel de l'observatoire de Montsouris*, n° 35, p. 205.
63. MASCHHAUPT (J. G.). 1921. — The composition of our crops in successive periods of growth (*Verlag. Land. Onderzoek. Rijkslandbonwproefsta*, n° 25, p. 131).
64. MAZÉ (P.). 1919. — Recherche d'une solution purement minérale capable d'assurer l'évolution complète du maïs cultivé à l'abri des microbes (*Ann. Inst. Pasteur*, t. 33, p. 139).
65. MAZÉ (P.). 1911. — Sur l'excrétion des substances minérales et organiques par les racines et les stomates aquifères (*C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 152, p. 452).
66. MEISNER (W.). 1816. — *Schweigger's Jahrbuch der Chemie und Physik*. Bd. 17, S. 340, 436.
67. MONVOISIN. 1900. — Recherches sur la végétation de quelques plantes fourragères. (*Ann. agron.*, t. 26, p. 77).
68. MUNTZ (A.). — Statique des cultures industrielles (Boussingault, t. 5, p. 66, 1874).
69. PERTUIS. 1797. — Mémoire sur les moyens de multiplier la fabrication de la potasse en France (*Ann. de Chim.*, t. 19, p. 157. Paris).
70. PIERRE (Isidore). 1864. — Recherches agronomiques (nouvelle série). Caen.
71. PIERRE (Isidore). 1882. — Chimie agricole ou l'agriculture considérée dans ses rapports principaux avec la chimie.
72. PREGL (F.). 1923. — Micro-analyse organique quantitative, traduit par Welter G. Paris.
73. RAULIN. 1870. — Etudes chimiques sur la végétation (Thèse doctorat Paris. *Ann. Sc. Nat. Bot.*, 5^e série, t. 11, 1869).
74. RIPPEL (August). 1927. — Über den Zusammenhang zwischen dem Aufnahmeverlauf der Bodennährstoffe bei den höheren Pflanzen und der Beweglichkeit dieser Stoffe in der Pflanze (*Biochemische Zeitschrift*, 187, p. 272).
75. RUCKERT. — Ruckert's Feld-Bau.
76. RUSTON (G. Arthur). 1914. — The influence of time of cutting upon the yield and composition of hay (*Univ. Leeds. J. Agr. Sc.*, 4, p. 305).
77. SACHS (J.). 1861. — Erziehung von Landpflanzen im Wasser (*Landw. Versuchsstat*, t. 3).
78. SALM-HORSTMAR. 1851. — Recherches sur la nutrition de l'avoine, particulièrement en ce qui concerne les matières inorganiques qui sont nécessaires à cette nutrition. Traduit par Barral et Laverrière (*Ann. Chim. et Phys.*, 3^e série, t. 32, p. 461).

79. SAUSSURE (Th. de 1804. — Recherches chimiques sur la végétation. Paris).
80. SEIDLER und STÜTZER. 1908. — *Journ. f. Lanwirthschaft*, t. 56, p. 273.
81. SHUTT (F.), HAMILTON (S. N.) and SELVYN (H. H.). 1928. — The protein content of grass, chiefly meadow (*alopecurus pratensis*) foxtail, as influenced by frequency of cutting (*J. Agr. Sc.*, 18, p. 411).
82. SHUTT (F.). 1930. — *J. Agr. Sc.*, 20, p. 123.
83. SHUTT (F. T.). 1930. — The composition and yield of grass as influenced by frequency of cutting and the application of fertilizer (*Dept. Agr. Canada, Rept. Dominion Chemist*, p. 4).
84. SÖDERBAUM (H. G.). 1917. — The chemical composition of green forage crops at different stages of developpement (*Kunigl. Landtbruks Akad. Handlinger och. Tidskriftr.*, 56, p. 185, n° 3. *Expt. Sta. Rec.*, 39, p. 836).
85. SOTOLA (Jerry). 1927. — Relation of maturity to the nutritive value of first, second and third cuttings of irrigated alfalfa (*J. Agr. Research.*, t. 35, p. 361).
86. STRIEGEL (A.). 1912. — Vergleichende Untersuchungen :
 A. Über Mineralstoffaufnahme verschiedener Pflanzenarten aus ungedüngtem Boden.
 B. Über den Einfluss der Botanischen Natur, der Herkunft und der Erntezeit auf die chemische Zusammensetzung von Wiesenhen (*Landw. Jahr.*, 43, p. 349).
87. TRINCHINETTI. 1863. — Sulla facolta assorbente delle radice de vegetabili. Milano.
88. Über die chemische Zusammensetzung der Grünfütterpflanzen in Verschiedenen Entwicklungsstufen. Mitteilung, nr 145 der Zentralanstalt für landwirtschaftliches Versuchswesen. Stockholm, 1917; nach Mitteilungen der Vereins zur Förderung der Moorkultur in *Deutschen Reiche*, 1917, Jahrg. 35, S. 431.
89. VILLARD et BŒUF. 1897. — Recherches sur la végétation des herbes de prairie (*Ann. agron.*, t. 23, p. 497).
90. VILLE (G.). — Recherches expérimentales sur la végétation, 1853 (*C. R. Ac. Sc. Paris*, 1855). Nouvelles recherches sur la végétation, 1857.
91. WAGNER (Heinrich). 1932. — Zum Wachstumsverlauf verschiedener Getreidearten, insbesondere von Hafer (*Z. für Pflanzenzernähr. Düng u. Bodenk.* A. 25 3/4, S. 48).
92. WAGNER (Heinrich). 1932. — Zum Wachstumsverlauf und zur Nährstoffaufnahme der Zuckerrübe im ersten und zweiten

- Wachstumsjahr. (*Z. für Pflanzenernähr. Düng u. Bodenk.* A. 25 3/4, S. 129).
93. WAGNER (Heinrich). 1932. — Zum Wachstumsverlauf landwirtschaftlicher Untzpflanzen. Mitteilung III (Mais, Buchweizen, Senf, Tabac und Mohn) (*Z. für Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.* A. 26 1/2, 8).
 94. WALSER. 1840. — Recherches sur les sécrétions des racines. Thèse Faculté Médecine Tubingen (*Ann. Sc. Nat. Bot.*, 2^e série, t. 14, p. 100).
 95. WIEGEMANN u. POLSTORFF. 1842. — Über die anorganischen Besandth. der Pflanzen; Kopp, Geschichte d. Chimie, B. 3, S. 42 und 259, 1845; Sachs, Geschichte d. Bot., S. 481 u. 566, 1875.
 96. WILFARTH. RÖMER u. WIMMER. 1906. — Über die Nährstoffe des Pflanzen in verschiedenen Zeiten ihres Wachstums (*Landw. Versuchsstat.*, t. 63, p. 1).
 97. WILLIAMS (R. D.). 1927. — The effect of the time of cutting Montgomery red clover for hay on the yield of hay and aftermath. (*Welsh. J. Agr.*, 3, p. 110).
 98. WOODMAN (H. E.), BLUNT (D. L.) and STEWART (J.). 1926. — Nutritive value of Pasture. I Seasonal variation in productivity, botanical and chemical composition and nutritive value of medium pasturage in a lightsandy soil (*J. Agr. Sci.*, 16, 205).
 99. WOODMAN (H. E.), BLUNT (D. L.) and STEWART (J.). 1927. — Nutritive value of Pasture II. Seasonal variation in productivity, botanical and chemical composition and nutritive value of medium pasturage on a heavy clay soil (*J. Agr. Sc.*, 17, p. 209).
 100. WOODMAN, NORMAN (D. B.) and BEE (J. W.). 1928. — The nutritive value of Pasture III. The influence of the intensity of grazing on the composition and nutritive value of pasture herbage. I (*J. Agr. Sc.*, 18, p. 266).
 101. WOODMAN (H. E.), NORMAN (D. B.) and BEE (J. W.). 1929. — Nutritive value of Pasture IV. The influence of the intensity of grazing on the yield, composition and nutritive value of pasture herbage II (*J. Agr. Sc.*, 19, p. 236).
 102. WOODMAN, NORMAN and FRENCH. 1930. — Nutritive value of Pasture. The influence of the intensity of grazing on the yield, composition and nutritive value of pasture herbage. Part. III (*J. Agr. Sc.*, t. 21, p. 267).
 103. WOODMAN and NORMAN. 1932. — Nutritive value of Pasture. The influence of the intensity of grazing on the yield, composition and nutritive value of pasture herbage. Part. IV (*J. Agr. Sc.*, t. 22, p. 852).

104. ZBOROVSKY (A.). 1928. — Über den Energiegehalt und die Energiespeicherung der Pflanzen mit Berücksichtigung ihres Kohlenstoff und Stickstoffgehaltes (*Biochemische Zeitschrift*, 193, S. 122).
105. ZÖLLER. 1864. — Aschenanalysen von Buchenlaub während verschiedener Wachstumsperioden (*Nobbe's Landw. Versuchsstat*, VI, S. 23).
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	
I. Les méthodes de la biochimie.....	7
Méthode analytique et méthode synthétique.	
II. Composition élémentaire des êtres vivants.....	9
Classification : éléments plastiques et éléments catalytiques.	
III. Applications pratiques : les engrais chimiques.....	10

PREMIÈRE PARTIE

Travaux antérieurs.

Aperçu historique des recherches effectuées sur la composition chimique des végétaux.

I. Sur l'utilité des substances minérales dans la vie des plantes	15
II. Sur l'absorption des sels minéraux par les végétaux....	18
III. La variation de la composition chimique des végétaux au cours de leur développement.....	20

DEUXIÈME PARTIE

Recherches personnelles.

Sur la présence du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du soufre, du phosphore, du sodium, du potassium, du calcium, du magnésium, du fer, du manganèse et du silicium dans les végétaux à diverses époques de leur développement.....	27
---	----

CHAPITRE I.

Méthodes de dosage utilisées dans ce travail.

I. Récolte et préparation des échantillons à analyser.....	29
II. Détermination des cendres : Cendres insolubles, cendres solubles, cendres totales.....	32
III. Dosage du carbone et de l'hydrogène.....	33
a) Essais préliminaires : Contrôle de la technique de dosage du carbone.....	34
b) Technique utilisée pour doser le carbone et l'hydrogène dans les végétaux.....	35
IV. Dosage de l'azote.....	38
V. Dosage du soufre.....	40
VI. Dosage du phosphore.....	43
VII. Dosage des métaux alcalins.....	44
a) Dosage du sodium.....	44
b) Dosage du potassium.....	45
VIII. Dosage des métaux alcalino-terreux.....	48
a) Dosage du calcium.....	48
b) Dosage du magnésium.....	49
IX. Dosage du fer.....	50
X. Dosage du manganèse.....	52
XI. Dosage du silicium.....	53
XII. Détermination de l'oxygène.....	55
XIII. Contrôle et purification des réactifs.....	56
XIV. Représentation des résultats.....	57

CHAPITRE II.

I. Etude du colza.....	59
a) Tableaux des résultats.....	62
b) Evolution de la composition chimique du colza au cours de son développement.....	66
II. Etude de l'avoine.....	75
a) Tableaux des résultats.....	76
b) Evolution de la composition chimique de l'avoine au cours de son développement.....	79
III. Etude du sarrasin.....	86
a) Tableaux des résultats.....	87

<i>b)</i> Evolution de la composition chimique du sar- rasin au cours de son développement.....	90
IV. Etude de la luzerne.....	96
<i>a)</i> Tableaux des résultats.....	98
<i>b)</i> Evolution de la composition chimique de la luzerne au cours de son développement.....	102
CONCLUSIONS	107
INDEX BIBLIOGRAPHIQUE	111

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Stabilité des Suspensoïdes.

Vu et approuvé :

Paris, le 10 avril 1934.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

